

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte

Informācijas tehnoloģijas institūts

Darja PLINERE

Doktora studiju programmas “Informācijas tehnoloģija” doktorante

**DAUDZAGENTU SISTĒMAS IZSTRĀDĀŠANA
PIEGĀDES ĶĒDES VADĪBAS EFEKTIVITĀTES
PAAUGSTINĀŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. habil. sc. comp.* **A. BORISOVS**

profesore *Dr. sc. ing.* L. ALEKSEJEVA

profesors *Dr. habil. sc. ing.* J. MERKURJEVS

RTU Izdevniecība

Rīga 2021

Plinere D. Daudzaģentu sistēmas izstrādāšana
piegādes ķēdes vadības efektivitātes
paaugstināšanai. Promocijas darba kopsavilkums.
– Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. – 47 lpp.

Iespiests saskaņā ar 2021. gada 13. maija RTU
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātes,
Informācijas tehnoloģijas institūta padomes sēdes
lēmumu, protokols Nr. 12100-2/4.

<https://doi.org/10.7250/9789934226908>

ISBN 978-9934-22-690-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 15. decembrī plkst. 14.30 tiešsaistē: <https://rtucloud1.zoom.us/j/94856558679>

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr.habil.sc.ing.* Zigurds Markovičs

Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr.sc.ing.* Artis Teilāns

Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija, Latvija

Vecākais zinātniskais darbinieks *Ph.D tehnoloģijās (Zinātņu kandidāts tehnoloģijās)*

Sergey Listopad

Krievijas Zinātņu akadēmijas Federālā pētījumu centra "Datorzinātne un kontrole"
Kaļiņingradas filiāle, Krievija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Darja Plinere (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 65 attēli, 50 tabulu, četri pielikumi, kopā 161 lappuse, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 105 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	6
Tēmas aktualitāte.....	6
Darba mērķis un uzdevumi	6
Aizstāvēšanai izvirzītās hipotēzes	7
Pētījuma objekts un priekšmets.....	7
Darbā izmantotās pētījumu metodes	7
Darba zinātniskais jaunieguvums.....	7
Darba praktiskā nozīmība.....	8
Darba aprobācija	8
Darba struktūra un apjoms	11
DARBA NODAĻU SATURA APRAKSTS.....	11
1. PIEGĀDES ĶĒDES VADĪBA UN TĀS EFEKTIVITĀTES UZLABOŠANAS METODES.....	11
Piegādes ķēdes vadības pamati un galvenie jēdzieni	12
Esošo piegādes ķēdes vadības veiktspējas uzlabošanas tehnoloģiju analīze	13
Eksistējošo daudzāģentu sistēmu apskats un prasības daudzāģentu sistēmai piegādes ķēdes vadībai	14
Izstrādājamās sistēmas veiktspējas mērīšana un tās rādītāji	14
Pirmās nodaļas secinājumi	15
2. DAUDZĀĢENTU SISTĒMAS PAMATI UN AĢENTU ĪPAŠĪBAS	15
Aģenta definīcija un klasifikācija.....	16
Mijiedarbība starp aģentiem daudzāģentu sistēmā.....	16
Aģentu izstrādāšanas ietvaru analīze.....	17
Otrās nodaļas secinājumi.....	17
3. DAUDZĀĢENTU SISTĒMAS IZSTRĀDĀŠANA PIEGĀDES ĶĒDES VADĪBAS EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANAI	18
Pieejas izstrādāšana daudzāģentu sistēmas izveidošanai	18
Izstrādātās daudzāģentu sistēmas konceptuālais modelis	19
Pārdošanas aģenta izstrādāšana	21
Ražošanas aģenta izstrādāšana	22
Krājumu vadības aģenta izstrādāšana	22
Iepirkuma aģenta izstrādāšana	23
Ontoloģiju izstrādāšana	23
Saskarnes izstrādāšana sākotnējo datu ievadīšanai daudzāģentu sistēmā.....	24

Daudzaģentu sistēmas arhitektūras izstrādāšana.....	26
Daudzaģentu sistēmas infrastruktūra un ierobežojumi	26
Trešās nodaļas secinājumi	27
4. IZSTRĀDĀTĀS DAUDZAĢENTU SISTĒMAS ATTĪSTĪŠANA	27
Jauna aģenta ieviešana daudzģentu sistēmā	27
Jauna efektivitātes rādītāja ieviešana daudzģentu sistēmā	28
Aģenta izņemšana no daudzģentu sistēmas.....	28
Izstrādātās daudzģentu sistēmas lietošanas apraksts	30
Ceturtās nodaļas secinājumi	30
5. IZSTRĀDĀTĀS DAUDZAĢENTU SISTĒMAS IZMANTOŠANA.....	30
Izstrādātās daudzģentu sistēmas aprobācija ražošanas uzņēmumā	31
Daudzaģentu sistēmas darbības realizācija un analīze	31
Eksperimentu plāns	33
Daudzaģentu sistēmas darbība otrā mēneša laikā un tās analīze	34
Daudzaģentu sistēmas darbība trešā mēneša laikā un tās analīze	35
Papildu eksperiments daudzģentu sistēmas darbības pārbaudei	35
Izstrādātās sistēmas lietošanas efektivitātes mērīšana	36
Piektās nodaļas secinājumi.....	37
PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTU ANALĪZE UN SECINĀJUMI.....	37
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	40

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Piegādes ķēdes vadības akadēmiskie un nozares pētījumi notiek arī mūsdienās. Daži pētījumi ir veltīti jaunas stratēģijas izstrādei, kas varētu palielināt peļņu vai samazināt izmaksas; citi cenšas veidot jaunus piegādes ķēdes vadības virzienus. Visu šo pētījumu mērķis ir uzlabot esošo piegādes ķēdi un tās efektivitātes rādītājus.

Mūsdienās tikai daži uzņēmumi veic piegādes ķēdes vadības uzlabošanas pētījumus, izmantojot iegūtos rezultātus un to priekšrocības. Viņu piegādes ķēdes vadības izmaiņas nemaina vai neietekmē citus piegādes ķēdes dalībniekus. Piegādes ķēdes vadības uzlabošana, kas var savienot dažādus piegādes ķēdes dalībniekus un uzlabot kopīgus un atsevišķus veikspējas rādītājus, joprojām ir aktuāls uzdevums.

Mūsdienu dinamiski mainīgajos apstākļos jāspēj laikus reaģēt uz piegādes ķēdes procesu izmaiņām. Programmatūras aģentu(-us) veiksmīgi lieto piegādes ķēdes vadības uzdevumos ar dažādiem mērķiem. Aģentu uzvedību nosaka to izstrādāšanas mērķis, un aģentu lietošanas efektivitāte tiek apskatīta atbilstoši to izstrādāšanas mērķiem. Ja aģentu daudzums ir vairāk par vienu, tad izstrādāšanas laikā jādefinē aģentu sazināšanās veids.

Neskatoties uz pieejamām daudzāģentu sistēmām [28, 29, 37, 77, 100], aģentu lietošana piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanai joprojām ir aktuāla problēma. Izstrādātajai sistēmai ir jābūt pielāgojamai dažādiem lietojumiem, un jābūt iespējai papildināt eksistējošās sistēmas.

Promocijas darbā veikts pētījums par daudzāģentu sistēmas izstrādi piegādes ķēdes vadības efektivitātes rādītāju uzlabošanai, ko var izmantot dažādi piegādes ķēdes dalībnieki, pievēršot lielāku uzmanību daudzāģentu sistēmas izstrādāšanas soļiem. Vienam no pirmajiem soļiem ir jābūt aģentu daudzuma noteikšanai un jaunu aģentu iekļaušanai, ja šāda nepieciešamība radīsies nākotnē, kā arī ir jāanalizē aģentu savstarpējais sazināšanās veids: ar “blackboard” sistēmas palīdzību, ontoloģiju vai sazinoties caur vidi. Promocijas darbā ir veikts pētījums par iespējamām sazināšanās veidiem, pievēršot lielāku uzmanību ontoloģijas izstrādāšanai un tās validācijai.

Promocijas darbā arī izpētīts piegādes ķēdes efektivitātes rādītāju saraksts, ar ko pārbauda lietošanas efektivitāti.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt pieeju daudzāģentu sistēmas izveidošanai, kas nodrošina piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanu. Mērķa sasniegšanai ir definēti vairāki uzdevumi:

- 1) izanalizēt un atlasīt piegādes ķēdes vadības efektivitātes rādītājus, kas pārklāj piegādes ķēdes uzdevumus, sistēmas efektivitātes pārbaudei;
- 2) izpētīt daudzāģentu sistēmas, to izmantošanu piegādes ķēdes vadībai un atkārtotu lietošanu;

- 3) izstrādāt daudzāģentu sistēmas arhitektūru, kas piemērota katram piegādes ķēdes mezglam, nodrošinot piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanu;
- 4) izveidot atkārtoti lietojamu daudzāģentu sistēmu un aprobēt to, izmantojot reāla uzņēmuma datus;
- 5) eksperimentāli pierādīt izstrādātās daudzāģentu sistēmas lietošanas efektivitāti, izmantojot atlasītos piegādes ķēdes efektivitātes rādītājus.

Aizstāvēšanai izvirzītās hipotēzes

Daudzāģentu sistēmas izveidošanas pieejas izstrādes gaitā ir izvirzītas šādas hipotēzes:

- 1) informācijas koplietošana daudzāģentu sistēmās spēj paātrināt daudzāģentu sistēmas darbību, izmantojot arī cita aģenta darbībai nepieciešamo informāciju vai tā rezultātus;
- 2) ontoloģijas izmantošana nodrošina daudzāģentu sistēmas atkārtotu lietošanu, izveidojot daudzāģentu sistēmas veidni piegādes ķēdes vadībai.

Pētījuma objekts un priekšmets

Promocijas darba pētījuma objekts ir piegādes ķēdes vadības efektivitātes rādītāju uzlabošanas sistēma.

Pētījuma priekšmets ir daudzāģentu sistēma ar ontoloģijām un informācijas koplietošanu.

Darbā izmantotās pētījumu metodes

Promocijas darbā izmantoti programmatūras aģenti, piedāvāts atspoguļot katru piegādes ķēdes mezglu ar vienādu aģentu kopumu. Aģentu uzvedību nosaka piegādes ķēdes darbības, piedāvājot piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanu. Promocijas darbā izmantotas vairākas piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanas metodes, piemēram:

- 1) krājumu vadība,
- 2) ražošanas plānošana.

Lai uzlabotu krājumu vadību, aģents apstrādā pieejamo informāciju par iepriekšējiem periodiem un izmanto ABC analīzi un prognozēšanas algoritmus nākotnes pasūtījumiem, kā arī veido papildināšanas politiku. Ražošanas uzlabošanai tiek piedāvāts izmantot ražošanas grafiku, tas ir, ražošanas secību, kas samazina kopējo ražošanas laiku, tādējādi samazinot ražošanas izmaksas. Sadarbība starp piegādes ķēdes mezgliem tiek īstenota, izmantojot ontoloģijas. Saziņa starp aģentiem vienā mezglā tiek īstenota, izmantojot datu un zināšanu koplietošanu, līdzīgi kā tas ir “*blackboard*” sistēmās.

Darba zinātniskais jaunieguvums

Promocijas darba zinātniskie jaunieguvumi un sasniegumi balstās esošo metožu analīzē un jaunievedumu piedāvājumos. Zinātniskie jaunieguvumi un galvenie sasniegumi ir šādi:

- 1) izstrādātā daudzāģentu sistēmas izveidošanas pieeja, kas ļauj to izmantot dažādiem piegādes ķēdes dalībniekiem un nodrošina piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanu. Šī pieeja nodrošina:
 - a) daudzāģentu sistēmas atkārtotu lietošanu, izmantojot izstrādāto saskarni ražošanas procesu aprakstīšanai,
 - b) piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanu, izmantojot izstrādātos aģentus, kas ietver algoritmus, kas uzlabo sistēmas veiktspēju;
- 2) piedāvāts hibrids aģentu sazināšanās veids: informācijas koplietošana viena mezgla aģentiem, šādi samazinot saziņas nepieciešamību, un ontoloģijas izmantošana starpmezglu aģentu mijiedarbībai.

Pētījuma gaitā ir sasniegti arī citi starprezultāti: izpētīti piegādes ķēdes vadības efektivitātes rādītāji; veikta aģentu sazināšanās līdzekļu analīze; izanalizētas pastāvošās ontoloģijas validācijas metodes; izpētītas metodes, kas var uzlabot piegādes ķēdes vadības efektivitātes rādītājus; piedāvāti aģentu darbības algoritmi piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanai.

Darba praktiskā nozīmība

Izstrādātās daudzāģentu sistēmas izmantošana dažādiem piegādes ķēdes dalībniekiem, ko nodrošina izstrādātā pieeja, kas ļauj īstenot atkārtotu lietošanu un efektivitātes uzlabošanu, izmantojot:

- 1) krājumu vadību, tādējādi samazinot krājumus un ar tiem saistītās uzglabāšanas izmaksas;
- 2) ražošanas plānošanu un pārplānošanu, kas palīdz definēt efektīvu ražošanas laiku un ļauj samazināt ražošanas kopējo laiku, šādi samazinot ražošanas izmaksas;
- 3) starpmezglu sazināšanos, kas paātrina starpmezglu mijiedarbību un nodrošina nepārtrauktu darbību.

Darba aprobācija

Par promocijas darba rezultātiem ziņots **14 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs**, saņemot pozitīvu vērtējumu.

1. IEEE seminārs “The 7th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering AIEEE’2019” (Latvija, 2019).
2. RTU 58. starptautiskā zinātniskā konference (Latvija, 2017).
3. RTU 57. starptautiskā zinātniskā konference (Latvija, 2016).
4. RTU 56. starptautiskā zinātniskā konference (Latvija, 2015).
5. Starptautiskā konference “Eighth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control” (Turcija, 2015).
6. RTU 55. starptautiskā zinātniskā konference (Latvija, 2014).
7. RTU 52. starptautiskā zinātniskā konference (Latvija, 2011).

8. Starptautiskā konference “15th International Conference on Soft Computing, MENDEL’09” (Čehijas Republika, 2009).
9. RTU 50. starptautiskā zinātniskā konference (Latvija, 2009).
10. RTU 49. starptautiskā zinātniskā konference (Latvija, 2008).
11. Starptautiskā konference “14th International Conference on Soft Computing, MENDEL’08”.
12. Zinatniskā ziemas skola “Estonian Winter School in Computer Science” (Igaunija, 2008).
13. RTU 48. starptautiskā zinātniskā konference (Latvija, 2007).
14. RTU 47. starptautiskā zinātniskā konference (Latvija, 2006).

Promocijas darba pamatrezultātus autore publicējusi **18 zinātniskajās publikācijās**, kas citētas 90 reizi.

1. Plinere, D., Aleksejeva, L., Merkuryev, Y. Multi-agent system development and application for supply chain management tasks. *Information Technology and Management Science*. 2021, vol. (in press).
2. Plinere, D., Merkuryev, Y. Designing A Multi-Agent System For Improving Supply Chain Performance. In: A. Romanovs, D. Navakauskas, A. Senfelds (eds.) *Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE): Proceedings of the 7th IEEE Workshop, Liepaja, Latvia, 15–16 November, 2019*. IEEE, 2019, pp. 62–68. Indexed in: Scopus. Cited: 2.
3. Plinere, D., Aleksejeva, L. Production Scheduling in Agent-based Supply Chain for Manufacturing Efficiency Improvement. *Procedia Computer Science*. 2019, vol. 149, pp. 36–43. (ICTE in Transportation and Logistics 2018). Indexed in: Scopus, Web of Science. Cited: 8.
4. Plinere, D., Borisovs, A. Case Study on Inventory Management Improvement. *Information Technology and Management Science*. 2015, vol. 18, pp. 91–96. ISSN 2255-9086. e-ISSN 2255-9094. Available from: doi:10.1515/itms-2015-0014. Cited: 30.
5. Plinere, D., Aleksejeva, L. Agent System Application as a Tool for Inventory Management Improvement. In: *Proceedings of Eighth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control (ICSCCW-2015)*, Turkey, Antalya, 3–4 September, 2015. b-Quadrat Verlag, 2015, pp. 157–166. Cited: 2.
6. Plinere, D., Borisov, A., Aleksejeva, L. Взаимодействие программных агентов в задаче согласования заказов. *Автоматика и вычислительная техника*. 2015, т. 49, № 5, с. 23–34. ISSN 0132-4160. Indexed in: Scopus, Web of Science, SpringerLink.
7. Plinere, D., Borisov, A., Aleksejeva, L. Interaction of Software Agents in the Problem of Coordinating Orders. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2015, vol. 49, no. 5, pp. 268–276. Indexed in: Scopus, Web of Science, SpringerLink. Cited: 5.

8. Plinere, D., Borisov, A. Development of Ontological Knowledge Model for Raw Materials Management Task. *Information Technology and Management Science*. 2014, vol. 17, pp. 61–65.
9. Plinere, D., Borisov, A. Evaluation of the Ontological Knowledge Model. *Information Technology and Management Science*. 2014, vol. 17, pp. 81–85. Cited: 2.
10. Плинере, Д. Интеллектуальность агентной системы для управления закупками и запасами в цепи поставок. In: International Conference “Information Intelligent Systems”, Kharkiv, Ukraine, 17–19 April, 2012. Vol.6, Kharkiv: 2012, pp. 148–149.
11. Plinere, D., Borisov, A. A Negotiation-Based Multi-Agent System for Supply Chain Management. *Information Technology and Management Science*. 2011, vol. 49, pp. 128–132. Cited: 3.
12. Plinere, D., Borisov, A. The Golden Section Task as a Tool of Ontology Logical Inference. In: Proceedings of Ninth International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing (ICAFS-2010), Czech Republic, Prague, 26–27 August, 2010. Kaufering: b-Quadrat Verlag, 2010, pp. 41–48.
13. Plinere, D., Borisov, A. Ontology-Based Knowledge Acquisition System for Product Life Cycle Task. In: Mendel 2009: Proceedings of 15th International Conference on Soft Computing, Czech Republic, Brno, 24–26 June, 2009. Brno: Brno University of Technology, 2009, pp. 292–297. Indexed in: Scopus.
14. Plinere, D., Borisov, A. SWRL: Rule Acquisition Using Ontology. *Information Technology and Management Science*. 2009, vol. 40, pp. 117–122. Cited: 13.
15. Plinere, D. Blackboard Architecture Programming for Product Life Cycle Stage Definition. *Scientific Journal of Riga Technical University. Information Technology and Management Science*. 2008, vol. 35, issue 5, pp. 70–75.
16. Rudenko D., Borisov A. Blackboard Architecture for Product Life Cycle Stage Definition. In: R. Matoušek (ed.) Mendel 2008: Proceedings of 14th International Conference on Soft Computing, Czech Republic, Brno, 18–20 June, 2008. Brno: Brno University of Technology, 2008, pp. 252–257. ISBN: 978-80-214-3675-6. Cited: 1.
17. Rudenko D., Borisov A. An Overview of Blackboard Architecture Application for Real Tasks. *Scientific Journal of Riga Technical University. Information Technology and Management Science*. 2007, vol. 31, issue 5, pp. 50–56. Cited: 19.
18. Rudenko, D., Borisov, A. Agents in Supply Chain Management: An Overview. *Scientific Journal of Riga Technical University. Information Technology and Management Science*. 2006, vol. 27, issue 5, pp. 123–133. Cited: 5.

Promocijas darba izstrādes laikā autore piedalījās trīs zinātniskajos projektos.

1. Rīgas Tehniskās universitātes akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās (RTU PVS ID 3826, C3826.8.1.) (17.04.2020.–16.04.2021.).
2. LZP grants nr. 051639, “Intelektuālās datortehnoloģijas slikti formalizējamiem lēmumu pieņemšanas uzdevumiem”. Vadītājs prof. A. Borisovs (2005.–2008.).

3. IZM–RTU pētniecības projekts R 7391 “Informācijas saplūšana izkliedētās intelektuālajās sistēmās”. Vadītājs vad. pētnieks A. Vališeviskis (1.03.2008.–31.12.2008.).

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbā ir ievads, piecas nodaļas, rezultātu analīze un secinājumi, literatūras saraksts un pielikumi. Darba teksts izklāstīts 161 lappusē un atspoguļots 65 attēlos un 50 tabulās. Literatūras sarakstā ir 105 atsauces.

Pirmā nodaļa veltīta piegādes ķēdes definīcijām, procesiem un uzdevumiem. Tajā aplūkotas dažādas iespējas uzlabot piegādes ķēdes darbību, to priekšrocības un trūkumi. Tā rezultātā piedāvāts izstrādāt daudzāģentu sistēmu, lai sasniegtu izpētes gaitā definētās prasības. Nodaļas beigās aprakstīti un analizēti piegādes ķēdes darbības efektivitātes rādītāji un to metrikas, pēc kurām tiks novērtēta izstrādātās daudzāģentu sistēmas lietošanas efektivitāte.

Otrajā nodaļā izpētīti aģenti un daudzāģentu sistēmas, aģentu mijiedarbības veidi, izanalizēti un novērtēti esošo daudzāģentu sistēmu lietošanas gadījumi. Nodaļas beigās aprakstīta *JADE* aģenta izstrāde.

Trešajā nodaļā aprakstīta pieejas izstrādāšana daudzāģentu sistēmas izveidošanai, aplūkoti izstrādāšanas soļi, daudzāģentu sistēmas arhitektūra un aģentu uzvedības algoritmi.

Ceturtnā nodaļā veltīta izstrādātās daudzāģentu sistēmas attīstībai. Nodaļā aprakstīta situācija, ja radīsies nepieciešamība jaunu aģentu ieviešanai sistēmā un/vai jaunu rādītāju iekļaušanai izstrādātajā daudzāģentu sistēmā. Nodaļas beigās apskatīta situācija, kad kāds no aģentiem nav nepieciešams un to ir jāizņem no sistēmas.

Piektajā nodaļā parādīta izstrādātās daudzāģentu sistēmas lietošana, analizēti reāla uzņēmuma dati un piedāvāta piegādes ķēdes vadības procesu uzlabošana. Nodaļas beigās veikta piegādes ķēdes darbības rezultātu analīze un izstrādātās daudzāģentu sistēmas lietošanas efektivitātes pārbaude.

Noslēgums veltīts definēto uzdevumu izpildes aprakstam un sasniegto rezultātu analīzei, kā arī vispārējiem secinājumiem par izstrādātās sistēmas lietojamību un turpmāko darbu.

DARBA NODAĻU SATURA APRAKSTS

1. PIEGĀDES ĶĒDES VADĪBA UN TĀS EFEKTIVITĀTES UZLABOŠANAS METODES

Nodaļā apskatītas piegādes ķēdes definīcijas, piegādes ķēdes risināmo uzdevumu klāsts un piegādes ķēdes vadības pamati. Tiek analizētas esošās piegādes ķēdes veiktspējas uzlabošanas tehnoloģijas, un piedāvāts detalizēts apskats par esošajām daudzāģentu sistēmām piegādes ķēdes vadībai. Nodaļas beigās noteiktas prasības daudzāģentu sistēmas izstrādāšanai un definēta piegādes ķēdes veiktspējas mērīšana un tās metrikas.

Piegādes ķēdes vadības pamati un galvenie jēdzieni

Piegādes ķēde ir loģistikas sistēmas mezglu kopums, kas ir lineāri sakārtots ar produkcijas, informācijas un finanšu plūsmām, lai analizētu specifiskās loģistikas funkcijas un (vai) izmaksas. Produkcijas plūsma ietver preču pārvietošanu galvenokārt no piegādātāja līdz pircējam, preču atgriešanas gadījumā šī plūsma maina virzienu. Informācijas plūsma ietver pasūtījumu nosūtīšanu un piegādes statusa atjaunināšanu. Finanšu plūsma sastāv no kredīta noteikumiem, maksājumu grafikiem un īpašumtiesību vienošanās. Piegādes ķēde atspoguļo produkcijas ceļu, sākot no izejvielu iegādes, to transformēšanu gatavā produkcijā un tās nogādāšanu gala patērētājiem. Tajā ir izejvielu piegādātāji, ražotāji, loģistiskie centri, noliktavas, transporta kompānijas, vairumtirgotāji, mazumtirgotāji un citi [48].

Piegādes ķēdes vadība savukārt ir disciplīna, kas vērsta uz piegādātāju, rūpnīcu, noliktavu, izplatīšanas centru un mazumtirgotāju integrāciju, lai preces tiktu ražotas un izplatītas pareizajiem klientiem, pareizajā laikā, pareizajā vietā un par pareizo cenu. Turklāt tādā veidā, kas samazina izmaksas, vienlaikus nodrošinot noteiktu pakalpojumu līmeni [82].

Piegādes ķēdes vadība iekļauj šādus posmus: plānošana; iegāde; ražošana; nogādāšana; atgriešana [102]. Katram posmam ir uzdevumi [93], ko ir vērts apskatīt atsevišķi.

Plānošanas posma uzdevums ir pārvaldīt visus resursus, kas tiek izmantoti klientu pieprasījuma apmierināšanai. Tas ir stratēģiskais lēmumu pieņemšanas līmenis. Viena no plānošanas posma daļām ir rādītāju kopuma vai galveno darbības rādītāju izstrādāšana, lai pārraudzītu piegādes ķēdes veiktspēju tā, lai tā būtu efektīva, samazinātu izmaksas un nodrošinātu augstu kvalitāti un vērtību klientiem.

Iegādes posma uzdevums ir piegādātāju izvēle, kuri nogādās izejvielas vai pakalpojumus, kas nepieciešami, lai ražotu precī vai nodrošinātu pakalpojumu. Jāizveido cenu kopums, preču nogādāšanas un apmaksas procesi ar piegādātājiem un metrika izveidoto attiecību uzraudzībai un uzlabošanai.

Ražošanas posms iekļauj ražošanas plānošanu, tā uzdevums ir ieplānot aktivitātes, kas nepieciešamas ražošanai, pārbaudei, iepakojšanai un sagatavošanai nogādāšanai. Šajā posmā jānovērtē kvalitātes līmeņi, produkcijas izlaide un darbinieku produktivitāte.

Nogādāšanas posma uzdevums ir koordinēt pasūtījumu saņemšanu no klientiem, attīstīt noliktavu tīklu, izvēlēties pārvadātājus, lai klienti saņemtu preces, un izveidot rēķinu sistēmu maksājumu saņemšanai.

Atgriešanas posmā ietilpst tīkla izveidošanas uzdevums, lai no klientiem saņemtu brāķētus un liekus produktus un atbalstītu klientus, kuriem ir problēmas ar piegādātajām precēm.

Iepriekš minētie uzdevumi formulē galvenos piegādes ķēdes vadības procesus, proti: izejvielu iegāde; ražošanas plānošana; gatavās produkcijas iepakojšana un nogādāšana; maksājumu koordinācija ar piegādātājiem un klientiem; ceļa izveidošana atgrieztajai produkcijai.

Plānošanas posmā ir jāplāno piegāde, pakalpojumu izmantošana, ražošana, pieprasījuma prognozēšana un drošības krājumi. Ir jāizstrādā rādītāju kopums vai galveno darbību rādītāji, kas notiek plānošanas posmā, lai pārraudzītu piegādes ķēdes veiktspēju.

Piegādes plānošanā uzņēmums var mainīt savu produkcijas piedāvājumu, pārvaldot divu faktoru kombināciju, un šie faktori ir ražošanas jauda un krājumi.

Pakalpojumu izmantošanas plānošanā uzņēmumam jāizlemj – izmantot vienu piegādātāju, vai vairākus. Vairāki piegādātāji nodrošina zināmu konkurenci un samazina risku, ja vienam piegādātājam neizdodas piegādāt izejvielas.

Ražošanas plānošanā informācijas tehnoloģijas tiek izmantotas galvenokārt kopējā plānošanā piegādes ķēdē. Mūsdienās plānošanas moduļi var sastāvēt no nelineāras optimizācijas paketes, jo ne visas pamatotās mērķa funkcijas vai ierobežojumi ir lineāras funkcijas. Jebkurā gadījumā lineārā programmēšana parasti ir labākā metode problēmu risināšanai [17].

Pieprasījuma prognozēšanas plānošana ir visas piegādes ķēdes plānošanas pamats. Pirmais solis, kas jāveic, ir – paredzēt, kāds būs klientu pieprasījums. Pagātnes pieprasījums, produkcijas papildināšanas izpildes laiks, plānotie reklāmas vai mārketinga pasākumi, plānotās cenu atlaides, ekonomiskais stāvoklis, kā arī dalībnieku veiktās darbības ietekmē pieprasījuma prognozēšanu. Ir četri prognozēšanas metožu veidi – kvalitatīvā, laikrindu, cēloņsakarību un modelēšanas prognozēšanas metodes [17].

Drošības krājumu plānošanas uzdevums ir noteikt tādu krājumu līmeni, kas apmierinātu pieprasījumu ar zemākām uzglabāšanas izmaksām. Uzglabāto krājumu daudzums ir vissvarīgākais jautājums produktiem ar īsu produktu dzīves ciklu, jo šie produkti var kļūt nevērtīgi [17]. Drošības krājumu līmeni nosaka šādi divi faktori: pieprasījuma un piegādes nenoteiktība; vēlamais produkta pieejamības līmenis. Gadījumā, ja pieaug nenoteiktība, palielinās nepieciešamais drošības krājumu līmenis. Palielinot vēlamo produktu pieejamības līmeni, palielinās arī nepieciešamais drošības krājumu līmenis.

Esošo piegādes ķēdes vadības veikspējas uzlabošanas tehnoloģiju analīze

Mēģinot uzlabot piegādes ķēdes vadības veikspējas rādītājus, pētnieku domas dalās, un notiek pētījumi vairākos virzienos. Apskatot literatūru, tika novērotas četras autoru grupas:

- pirmā grupa [46, 96] pētīja objektu izvietojuma uzdevumu;
- otrā grupa [83, 88] piedāvāja izmantot imitācijas modelēšanas programmatūru;
- trešā grupa [31, 41, 52] lietoja *LEAN* ražošanas procesu;
- ceturtā grupa [28, 29, 37, 77, 100] piegādes ķēdes vadībai ierosināja izmantot aģentus.

Visi minētie pētnieki sasniedza savus mērķus, un šos pētījumu virzienus var veiksmīgi izmantot atbilstoši konkrētajam uzdevumam.

1. Objektu izvietojums ir stratēģiskās plānošanas uzdevums; tas galvenokārt ir nepieciešams piegādes ķēdes stratēģiskās plānošanas posmā, tajā risina šādus jautājumus: kur būvēt vai iznomāt rūpnīcu, noliktavu, noteikt to daudzumu optimālai uzņēmuma darbībai; kā noteikt iekārtu izvietojumu un to jaudas. Jau eksistējošas piegādes ķēdes gadījumā risināmais uzdevums varētu būt nākamās ēkas atvēršana vai iekārtu pirkšana, lai apmierinātu lielāku klientu pieprasījumu.
2. Imitācijas modelēšanas rīka izmantošanas priekšrocība ir dažādu stratēģiju lietošana un labākās stratēģijas vai piegādes ķēdes labākās konfigurācijas noteikšana.

3. *LEAN* metodoloģija var nodrošināt nepārtrauktu darbības uzlabošanu, izslēdzot liekās un vērtību nepalīdzinošās darbības piegādes ķēdē.
4. Daudzaģentu sistēma var piedāvāt piegādes ķēdes vadības uzlabošanu, sadalot uzdevumus aģentiem, un tie sadarbosies, lai sasniegtu labākus sistēmas veiktspējas rezultātus [62].

Analizējot iepriekšminētos pētījumu virzienus, tika secināts, ka piegādes ķēdes vadības veiktspējas uzlabošanai vispiemērotākās ir daudzāģentu sistēmas, jo tās spēj piedāvāt pastāvīgu uzlabošanu dinamiski mainīgos apstākļos, iekļauj arī citas uzlabošanas metodes un tās var sekmīgi izmantot gan esošos, gan jaunus uzņēmumos.

Eksistējošo daudzāģentu sistēmu apskats un prasības daudzāģentu sistēmai piegādes ķēdes vadībai

Daudzaģentu sistēmas tiek izmantotas dažādās problēmu jomās, piemēram, veselības aprūpē [3, 32, 80], izglītībā [7, 23, 50] un citās. Promocijas darbā analizētas tikai daudzāģentu sistēmas piegādes ķēdes vadībai. Tika izvēlēti pieci darbi [28, 29, 37, 77, 100], kas apskata līdzīgus jautājumus tiem, kādi apskatīti promocijas darbā, taču neatrisina konkrētos uzdevumus.

Analīzes rezultātā secināts, ka esošās daudzāģentu sistēmas nav piemērotas atkārtotai izmantošanai, jo tās ir izstrādātas konkrētiem uzdevumiem, tāpēc tika definētas šādas daudzāģentu sistēmas prasības piegādes ķēdes vadības uzlabošanai:

- 1) spēja darboties ar reāla uzņēmuma datiem;
- 2) spēja paredzēt pieprasījumu;
- 3) ražošanas plānošana un pārplānošana;
- 4) spēja komunicēt ar piegādātājiem un klientiem;
- 5) krājumu vadības metodoloģijas pielietošana;
- 6) informācijas koplietošana starp viena uzņēmuma aģentiem;
- 7) atkārtota daudzāģentu sistēmas lietošana.

Tāpēc ir nepieciešams izveidot sadalītu daudzāģentu sistēmu, kas piedāvā piegādes ķēdes funkciju izpildi tādā veidā, lai palielinātu kopējo veiktspēju. Piegādes ķēdes procesi ir sadalīti vairākos aģentos, šie aģenti var veikt savas darbības paralēli, tādējādi samazinot darbības laiku. Izstrādātajai sistēmai jānodrošina informācijas koplietošana starp aģentiem, tādējādi samazinot izpildes laiku, izvairoties no liekas komunikācijas starp aģentiem.

Izstrādājamās sistēmas veiktspējas mērīšana un tās rādītāji

Efektīva piegādes ķēdes vadība ir plānota un mērķtiecīga. Uz vērtību orientēta piegādes ķēde, kas atbilst uzņēmuma stratēģiskajām prioritātēm, ir apzinātas vadības darbības un stratēģisko ieguldījumu rezultāts [45].

Visbiežāk piegādes ķēdes veiktspējas mērīšanai izmanto šādus rādītājus [27]: pasūtījuma izpildes laiks – laiks no pasūtījuma saņemšanas līdz pasūtīto preču piegādei, preču un izstrādājumu kvalitāte, jaudas izmantošana, plānošanas metode, klientu apkalpošanas līmenis, piegāde laikā, klienta pieprasījuma apstrādes laiks un krājumu izmaksas.

Saskaņā ar prasībām izstrādājamai sistēmai izstrādājamās piegādes ķēdes vadības sistēmas veiktspējas rādītāji ir apkopoti 1.1. tabulā. Šī pētījuma mērķis ir nodrošināt sistēmu, kas pilda piegādes ķēdes funkcijas, nodrošinot veiktspējas uzlabošanu, tāpēc veiktspējas rādītāji atspoguļo pētījuma mērķi. Izstrādātās sistēmas ieguvumus var aprēķināt, izmantojot minētos rādītājus. Šo rādītāju mērķa lielumu sasniegšana virza sistēmu līdz ideālās sistēmas veiktspējas sasniegšanai.

1.1. tabula

Piegādes ķēdes veiktspējas rādītāji un to kritēriji

#	Piegādes ķēdes veiktspējas rādītāji	Kritērijs
1.	Kopējais ražošanas laiks	Kopējā ražošanas laika samazināšana
2.	Krājumu uzglabāšanas izmaksas	Krājumu samazināšana, bez deficīta gadījumiem
3.	Pircēju pieprasījumu apstrādes laiks	Pieprasījumu apstrādes laika samazināšana
4.	Servisa līmenis	Vēlamā servisa līmeņa sasniegšana

Izstrādātajai sistēmai nav nepieciešams nodrošināt pārdošanas stratēģiju modifikācijas, tāpēc pārdošanas daudzuma izmaiņas netiks ņemtas vērā. Tāds rādītājs kā piegāde laikā arī netiks ņemts vērā, jo ar produkcijas nogādāšanu bieži nodarbojas cits uzņēmums, ražošana beidzas ar produkcijas iepakojumu un tās ievietošanu noliktavā.

Pirmās nodaļas secinājumi

Pēc iegūtiem analīzes un pētījumu rezultātiem tika izdarīti galvenie pirmās nodaļas secinājumi. Pirmkārt, eksistē dažādas metodes piegādes ķēdes vadības veiktspējas uzlabošanai, katra no tām ir efektīva konkrētajiem gadījumiem. Otrkārt, esošās daudzāģentu sistēmas tiek izstrādātas atsevišķiem uzdevumiem vai uzņēmumiem un tās nevar lietot atkārtoti. Treškārt, atkārtoti lietojamas daudzāģentu sistēmas izstrādāšana spēj piedāvāt vienotu sistēmu piegādes ķēdes dalībniekiem.

Nākamais solis promocijas darba mērķa sasniegšanai ir izpētīt daudzāģentu sistēmas īpatnības, tās arhitektūru un izstrādāšanu.

2. DAUDZAĢENTU SISTĒMAS PAMATI UN AĢENTU ĪPAŠĪBAS

Nodaļā aprakstīti mākslīgā intelekta aģenti un daudzāģentu sistēmas. Nodaļas sākumā apskatītas aģenta definīcija un īpašības, sniegta aģentu arhitektūras klasifikācija. Aģentu mijiedarbības iespējas daudzāģentu sistēmās paskaidrotas nodaļas vidū. Nodaļā detalizēti aprakstītas tāfeles (*blackboard*) sistēma un ontoloģija, kā arī to lietošanas priekšrocības. Pārskats par daudzāģentu sistēmu izstrādes platformām dots nodaļas beigās.

Aģenta definīcija un klasifikācija

Promocijas darba autore piedāvā apkopot vairākas definīcijas [43, 76, 97] un uzskatīt, ka aģenta definīcija ir saprotama šādi: **aģents** ir autonoma un proaktīva skaitļošanas sistēma, kas mijiedarbojas ar savu vidi, savlaicīgi reaģē uz vides izmaiņām un var sazināties un sadarboties ar citiem aģentiem vai lietotājiem, lai sasniegtu savu mērķi.

Daudzaģentu sistēmas ir sistēmas, kas sastāv no vairākiem mijiedarbīgiem skaitļošanas elementiem, kas pazīstami kā aģenti [97].

Daudzaģentu sistēmas lietošanas priekšrocības ir šādas: aģenti ir dinamiski, autonomi, spēj mijiedarboties ar citiem aģentiem un/vai lietotājiem un datubāzēm un serveriem, spēj adaptēties jaunos apstākļos, spēj apmācīties, ir proaktīvi, var būt mobili, neatkarīgi, intelektuāli, mērķorientēti, reaktīvi, un daudzaģentu sistēmās var sadalīt procesus, lai tie darbotos paralēli.

Par pamatu aģentu arhitektūras izstrādāšanā autore ņēmusi divas aģentu klasifikācijas [54, 76]:

- 1) aģentu klasifikācija ietver astoņus aģentu tipus [54]: sadarbības, saskarnes, mobilie, informācijas, reaktīvie, hibrīdie, viedie un heterogēnas aģentu sistēmas;
- 2) aģentu arhitektūru var klasificēt, iedalot aģentus vienkāršos refleksīvos, modelī balstītos, mērķī balstītos, uz lietderību balstītos un ar apmācības iespējām [76].

Promocijas darbā izvēlēta heterogēna aģentu sistēma un mērķī balstīti aģenti. Šajā darbā netika izvēlēti aģenti ar apmācības iespējām, taču pastāv iespēja tos apskatīt un izmantot turpmākajos pētījumos.

Mijiedarbība starp aģentiem daudzaģentu sistēmā

Aģenta galvenā iezīme ir tā spēja mijiedarboties ar savu vidi. Aģents uztver savu vidi, izmanto to, ko uztver, lai izvēlētos darbību, un pēc tam veic darbību ar tā efekturu palīdzību [91].

Daudzaģentu sistēmas gadījumā aģentiem var būt nepieciešams mijiedarboties savā starpā, un šie mijiedarbības veidi ir šādi [100]:

- sadarbība – darbība kopīga mērķa sasniegšanai;
- koordinēšana – problēmu risināšanas aktivitātes organizēšana, lai izvairītos no kaitīgas mijiedarbības vai lai tiktu izmantota labvēlīga mijiedarbība;
- pārrunas – vienošanās panākšana, kas ir pieņemama visām iesaistītajām pusēm.

Aģentu mijiedarbībai ir nepieciešams saziņas veids. Autores veiktā esošo daudzaģentu sistēmu pētījumu [62, 74, 102] analīze atklāja, ka esošās daudzaģentu sistēmas aģentu komunikācijai izmanto tāfeles sistēmu [12, 19, 47, 57, 90] vai ontoloģiju [4, 15, 29].

Daudzaģentu sistēmas ir piemērotas jomām, kurās notiek mijiedarbība starp dažādiem cilvēkiem vai organizācijām ar atšķirīgiem un, iespējams, pretrunīgiem mērķiem, un slepenu informāciju. Piegādes ķēde tiek uzskatīta par intelektisku aģentu kopumu, kur katrs aģents ir atbildīgs par vienu vai vairākām darbībām piegādes ķēdē. Ontoloģija savukārt apraksta priekšmeta apgabalu un kļūst par mehānismu, kas palīdz izprast un analizēt informācijas plūsmu starp aģentiem. Ontoloģijas izmantošana daudzaģentu sistēmai nodrošina šādas

priekšrocības: ontoloģija ļauj zināšanas strukturēt un ar tām dalīties; palielina daudzāģentu sistēmas uzticamību; nodrošina mijiedarbības pamatu starp aģentiem [62].

Saziņu starp aģentiem daudzāģentu sistēmā var panākt, izmantojot tāfeles arhitektūru. Tie nesazinās cits ar citu, bet izmanto tāfeli kā centrālo depozitāriju, tur ievieto datus, un aģenti gaida sev piemērotus datus, lai sniegtu savu ieguldījumu. Aģenti strādā konsekventi; tāfele tiek izmantota kā centrālā krātuve visai kopīgajai informācijai. Visi aģentu daļēji iegūtie rezultāti tiek izlikti uz tāfeles, un citi aģenti tos izmanto, tiklīdz tiek atrasts galīgais risinājums [74].

Autore uzskata, ka ontoloģijas lietošana aģentu saziņai ir perspektīvākais sazināšanās veids, un piedāvā ieviest daudzāģentu sistēmā informācijas koplietošanu līdzīgi, kā tāfele ir tāfeles arhitektūrā.

Aģentu izstrādāšanas ietvaru analīze

Pastāv vairāki pārskati un aptaujas par aģentu izstrādāšanas ietvariem un platformām [6, 9, 38], tāpēc autore piedāvā tos analizēt atbilstoši prasībām. Lai izvēlētos izstrādāšanas ietvaru ar vēlamo vērtību, ir šādi atribūti: cena – bezmaksas; veikspēja – augsta; standarta savietojamība – *FIPA* (lai sadarbotos ar citiem aģentiem, kas atbilst vienam un tam pašam standartam); apguve – ērts un augsts lietotāju atbalsts. Atribūti ir uzskaitīti dilstošā secībā pēc to nozīmīguma, kas nozīmē, ka izmaksas ir vissvarīgākais atribūts ietvaru atlasē.

Vispiemērotākais ietvars ir bezmaksas, ar augstu veikspēju, saderīgs ar *FIPA* standartu, ar augstu lietotāju atbalstu un ar vieglu iemācīšanās iespēju – *JADE*. Autori [6, 34, 38, 49] nosauc *JADE* par populārāko ietvaru.

Autore piedāvāja izmantot *JADE* kā daudzāģentu sistēmas izstrādes ietvaru piegādes ķēdes vadības uzdevumam 2011. gadā [62]. Galvenie iemesli bija: pirmkārt, iepriekš saņemtās zināšanas par aģentiem un aģentu saziņas integrēšanu vienā platformā [66, 67, 73], otrkārt, vienkāršais veids, kā iemācīties aģentu konstruēšanu *JADE*; treškārt, aģentu komunikācijas vizualizācijas iespējas.

Otrās nodaļas secinājumi

Pēc iegūtiem analīzes un pētījumu rezultātiem tika izdarīti galvenie šīs nodaļas secinājumi:

- 1) aģentu saziņu var realizēt divos veidos: tāfeles sistēma vai ontoloģija;
- 2) turpmākajos pētījumos tiks analizēti un lietoti aģenti ar apmācības iespējām.

Autore piedāvā izmantot ontoloģiju aģentu saziņai starp piegādes ķēdes mezgliem un ieviest informācijas koplietošanu viena mezgla aģentiem sākotnējiem datiem, daļējiem un gala rezultātiem, kā tas ir tāfeles arhitektūrā.

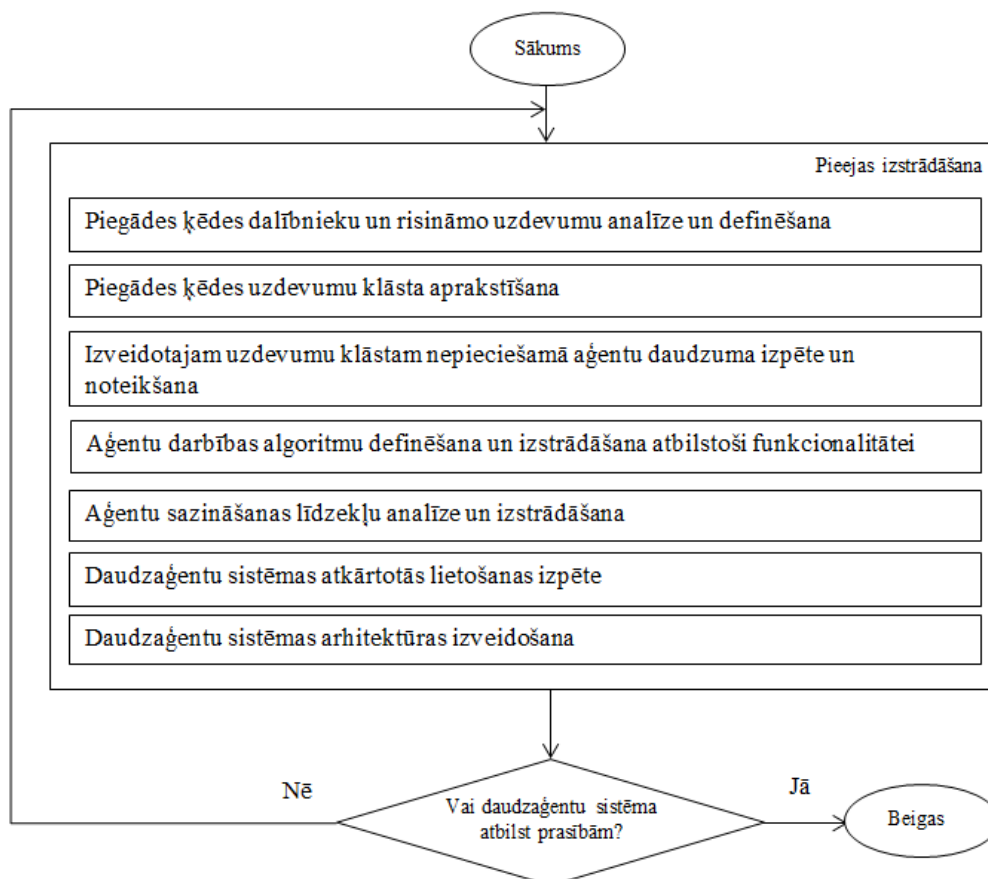
Nākamais uzdevums pieejas izstrādāšanā ir daudzāģentu sistēmas arhitektūras izveidošana, kas ir piemērota katram piegādes ķēdes mezglam, nodrošinot piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanu.

3. DAUDZAĢENTU SISTĒMAS IZSTRĀDĀŠANA PIEGĀDES ĶĒDES VADĪBAS EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANAI

Nodaļā aprakstīti daudzāģentu sistēmas izstrādāšanas posmi piegādes ķēdes vadībai *JADE* ietvarā. Nodaļas sākumā aprakstīta izstrādātā pieeja daudzāģentu sistēmas izveidošanai. Daudzāģentu sistēmas izstrādāšana pēc šīs pieejas sākas ar konceptuālu daudzāģentu sistēmas aprakstu un aģentu skaita noteikšanu. Talāk tiek aprakstīta daudzāģentu sistēmas arhitektūra – definēti aģentu uzvedības un sazināšanās līdzekļi starpmezglu saziņai, kā arī informācijas koplietošanas iespējas izstrādāšana viena mezgla aģentiem. Saskarnes izstrādāšana daudzāģentu sistēmai parādīta šīs nodaļas beigās. Nodaļas noslēgumā ir aprakstīta *JADE* ietvarā izstrādātā daudzāģentu sistēma un izstrādātās sistēmas ierobežojumi.

Pieejas izstrādāšana daudzāģentu sistēmas izveidošanai

Pieejas izstrādāšana (3.1. att.) nodrošina daudzāģentu sistēmas izveidošanu piegādes ķēdes vadībai tā, lai to varētu lietot dažādi piegādes ķēdes dalībnieki un lai tā nodrošinātu piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanu.



3.1. att. Daudzāģentu sistēmas izstrādāšanas pieeja.

Pieejas izstrādāšanai tika veiktas šādas darbības:

- 1) analizēti un definēti piegādes ķēdes dalībnieki un risināmie uzdevumi;
- 2) aprakstīts piegādes ķēdes uzdevumu klāsts;

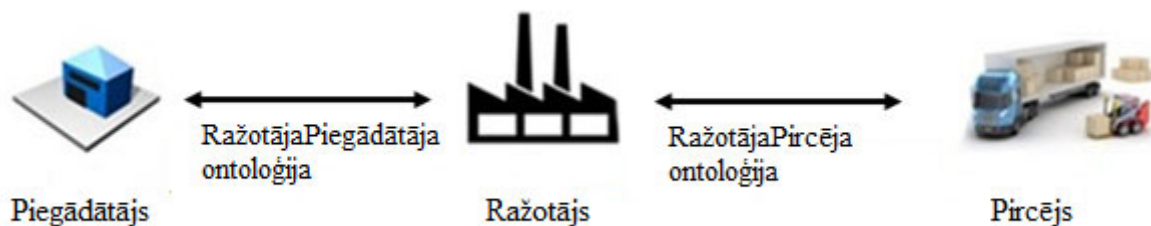
- 3) izveidotajam uzdevumu klāstam izpētīts un noteikts nepieciešamo aģentu daudzums;
- 4) definēti un izstrādāti aģentu darbības algoritmi atbilstoši funkcionalitātei;
- 5) analizēti un izstrādāti aģentu sazināšanās līdzekļi;
- 6) izpētīta un izstrādāta daudzāģentu sistēmas atkārtota lietošana;
- 7) izveidota daudzāģentu sistēmas arhitektūra.

Atbilstoši izstrādātajai pieejai tika izveidota daudzāģentu sistēma, kas aptver definētās prasības, un tā tika novērtēta pēc iepriekš definētiem efektivitātes rādītājiem (1.1. tab.).

Izstrādātās daudzāģentu sistēmas konceptuālais modelis

Pēc izstrādātās pieejas tika izveidota daudzāģentu sistēma, ko varēs izmantot visi piegādes ķēdes dalībnieki, taču darbā sistēmas darbība detalizēti demonstrēta ražotāja mezglā, jo tajā ir iekļauti ražošanas procesi. Izstrādātajiem aģentiem jābūt dinamiskiem, lai strādātu ar dinamiskiem datiem, autonomiem un proaktīviem – nepārtrauktai situācijas analīzei, negaidot lietotāja iejaukšanos, mērķtiecīgiem – aģentu uzvedība ir orientēta uz mērķa sasniegšanu, intelektuāliem – mērķu sasniegšanai, pamatojoties uz aprēķiniem. Komunikācija starp piegādes ķēdes mezgliem tiek nodrošināta ar divām izstrādātajām ontoloģijām (3.2. att.).

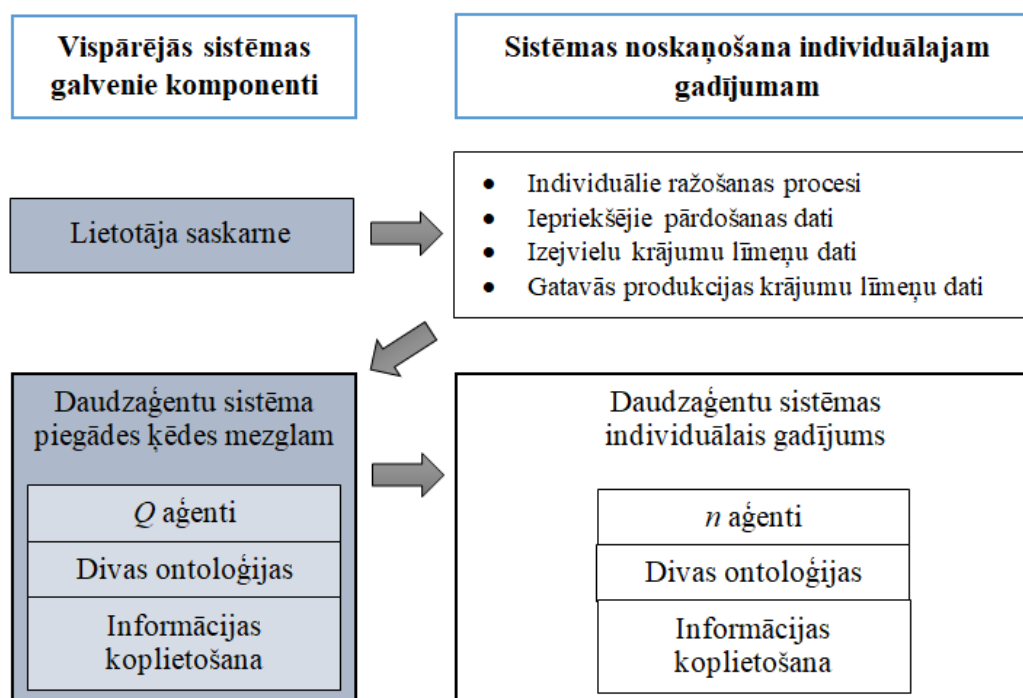
Saziņa starp aģentiem vienā mezglā promocijas darbā apskatīta, par piemēru ņemot ražotāja mezglu, un tiek realizēta, koplietojot informāciju, līdzīgi kā tas tika aprakstīts tāfeles sistēmā.



3.2. att. Starpmezglu mijiedarbība ar ontoloģiju palīdzību.

Lietotāja saskarnes izstrādāšana, kas apraksta ražošanas procesus daudzāģentu sistēmā, un izstrādātās aģentu uzvedības, kas nav atkarīgas no katra individuālā gadījuma datiem, nodrošina izveidotās daudzāģentu sistēmas atkārtotu izmantošanu. Daudzāģentu sistēmu var atkārtoti izmantot citi piegādes ķēdes dalībnieki, un tā satur šādus elementus: lietotāja saskarne individuālam ražošanas procesa aprakstam, n aģenti, kuru skaits tiks apspriests tālāk tekstā, divas ontoloģijas saziņai starp mezgliem un informācijas koplietošanas realizācija.

Ražošanas procesu aprakstīšana lietotāju saskarnē un datu pievienošana, kas ir nepieciešamas aģentu darbībām, izveido individuālu daudzāģentu sistēmas realizāciju (3.3. att.).



3.3. att. Daudzaģentu sistēmas jaunā gadījuma izstrādāšanas apraksts.

Ņemot vērā piedāvāto daudzāģentu sistēmas izstrādāšanas pieeju, vispirms jādefinē aģentu skaits ražotāja mezglā un to uzvedības.

Piegādes ķēdes funkcijas ir jāsadala starp aģentiem tādā veidā, kādā tās pastāv dabā; katram aģentam jābūt pārkonfigurējamam bez visas sistēmas pārveidošanas. Aģentam vispārējā veidā jāatspoguļo viena no piegādes ķēdes funkcijām, piemēram, iegāde, ražošana vai pārdošana. Šie trīs aģenti var pārstāvēt ražotāja mezglu, taču promocijas darbā tiek piedāvāts uzlabot piegādes ķēdes veiktspējas rādītājus, tāpēc izstrādātajā daudzāģentu sistēmā jāiekļauj arī krājumu vadība.

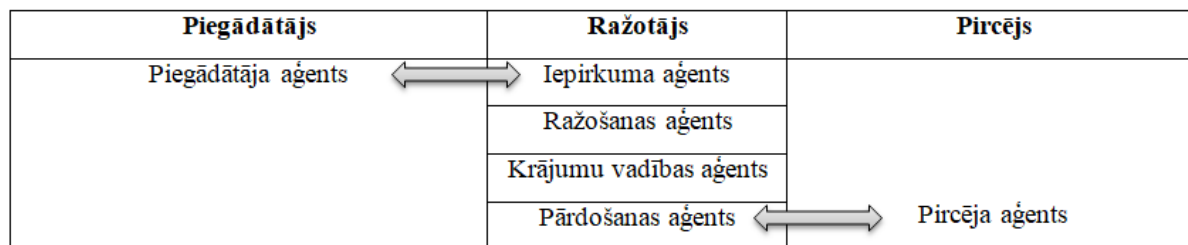
Piegādes ķēdes vadības funkcijas ir sadalītas četros aģentos, kas apkopoti 3.1. tabulā. Šīs funkcijas pastāv katrā piegādes ķēdes mezglā, tāpēc katru mezglu var attēlot ar līdzīgiem aģentiem. Ražošanas funkcija var būt arī citiem mezgliem, ne tikai ražošanas mezglam, piemēram, komplekta izveidošana no iegādātiem galdiem un krēsliem izplatītāja mezglā.

3.1. tabula

Piegādes ķēdes funkciju sadalīšana aģentos

#	Piegādes ķēdes funkcijas	Aģenta nosaukums
1	Iegāde	Iepirkuma aģents
2	Ražošana	Ražošanas aģents
3	Pārdošana	Pārdošanas aģents
4	Krājumu vadība	Krājumu vadības aģents

Lai promocijas darbā ietvertu saziņas funkciju starp piegādes ķēdes mezgliem, tiek piedāvāts izveidot vēl divus piegādātāju un izplatītāju/klientu uzņēmumu aģentus – piegādātāja aģentu un pircēja aģentu, kuru saziņa starp mezgliem ar bultiņu palīdzību parādīta 3.4. att. Šo divu aģentu mērķi un uzvedības ir attiecīgi līdzīgi ražotāja pārdošanas aģentam un iepirkuma aģentam.



3.4. att. Izstrādātās daudzāģentu sistēmas aģenti.

Pārdošanas aģenta izstrādāšana

Tiek pieņemts, ka Pārdošanas aģentam nav informācijas par pircēju pieprasījumu nākotnē vai pastāv ierobežota informācija par pircēju pieprasījumu, lai gan informācijas apmaiņa par pieprasījumu var sniegt labumu visiem piegādes ķēdes dalībniekiem.

Izstrādātajā daudzāģentu sistēmā ir piedāvāta šāda Pārdošanas aģenta uzvedība: aģents ir atbildīgs **par pasūtījumu pieņemšanu no pircējiem**, mijiedarbojas ar pircējiem par piegādes laiku. Produkcijas cena ir noteikta, aģents to nevar mainīt.

Sākumā Pārdošanas aģents ir dīkstāvē; tas tiek aktivizēts, kad no Pircēja aģenta tiek saņemts jauns pasūtījums. Pārdošanas aģenta uzvedības noteikumi ir šādi:

- ja pasūtītais daudzums ir pieejams noliktavā, rezervēt to un piedāvāt Pircēja aģentam cenu un piegādes laiku;
- ja Pircēja aģents pieņem cenu un piegādes laiku, tad sākt pārdošanas procedūru;
- ja Pircēja aģents nepieņem cenu un piegādes laiku, tad atcelt pasūtīto produktu rezervāciju un pārtraukt sarunas;
- ja krājumu līmenis ir mazāks par pasūtīto daudzumu, tad piedāvāt Pircēja aģentam gaidīt laiku, kas vienāds ar T (kur $T = T_{ražošanas}$ vai $T = T_{ražošanas} + T_{iepirkuma}$, ja izejvielu daudzums nav pietiekams pasūtītā produkta salikšanai);
- ja Pircēja aģents atsakās gaidīt laiku T , tad pārtraukt sarunas;
- ja Pircēja aģents piekrīt gaidīšanas laikam T , tad turpināt sarunas, līdz Pircēja aģents saņem pasūtīto daudzumu.

Saziņa starp Pārdošanas aģentu un Pircēja aģentu tiek realizēta, izmantojot *RažotājaPircēja* ontoloģiju. Šiem aģentiem ir kopēja izpratne par informāciju, par kuru tie runā.

Ražošanas aģenta izstrādāšana

Iekārtu jauda, preču ražošanas procesu secība un to izpildes laiki tiek definēti, aizpildot lietotāja saskarnes laukus. Promocijas darbā ir pieņemts, ka dažāda veida izstrādājumiem nav nepieciešama aprīkojuma pārkonfigurācija, netiek ņemta vērā arī energoefektivitāte.

Izstrādātajā daudzāģentu sistēmā ir piedāvāta šāda Ražošanas aģenta uzvedība: aģents ir atbildīgs par plānošanu un pārplānošanu ražošanā, ir atbildīgs par esošajiem ražošanas pasūtījumiem, **plāno jaunu pasūtījumu izpildi ražošanā un pārplāno ražošanas secību**, ja tas ir iespējams ražošanas laika samazināšanai.

Ražošanas aģenta darbības algoritms ir šāds:

- 1) n esošajiem izstrādājumiem iespējamie dažādie varianti ir $n!$. Ja ir nepieciešams saražot piecu tipu izstrādājumus, tad $n! = 120$;
- 2) jāpārbauda kopējais ražošanas laiks katram $n!$ variantam; pārdomātai ražošanas secībai ir vismazākais kopējais ražošanas laiks;
- 3) ja kopējais ražošanas laiks pārsniedz noteikto termiņu, tiek izmantots ražošanas procesa prioritātes līmenis, kas balstās uz ABC analīzes rezultātiem: augstākā prioritāte ir A klases produktiem, tad B klases produktiem, viszemākā prioritāte ir C klases produktiem. Ja produkti pieder vienai klasei, tad ražošanas procesa prioritāte tiek piešķirta produktam, kura ražošanas laiks ir īsāks.

Šis darbības algoritms nodrošina efektīvu iekārtu noslodzi un samazina kopējo ražošanas laiku, šādi samazinot ražošanas izmaksas un novēršot lieku gaidīšanas laiku.

Krājumu vadības aģenta izstrādāšana

Tiek pieņemts, ka ražotājam nav informācijas par turpmāko preču pieprasījumu, taču ir pieejama informācija par iepriekšējo pieprasījumu. Produkcijas krājumu samazināšanai daudzāģentu sistēmā tiek piedāvāts izmantot krājumu vadības paņēmienus.

Krājumu vadības aģentam ir informācija par izejvielu un gatavo preču daudzumu no datubāzēm. Tā galvenā funkcija ir pieņemt lēmumus par to, kad un cik daudz izejvielu pirkt un kad un cik daudz produktu saražot. Aģentam ir zināšanas par iespējamo minimālo krājumu līmeni, t. i., drošības krājumu daudzumu, par ražošanas jaudu, kā arī aģentam ir nākotnes pieprasījuma prognozēšanas algoritms. Krājumu vadības aģents izmanto šādas metodes: ABC analīzes algoritmu, lai noteiktu vadības kontroli, nākotnes pieprasījuma prognozēšanas algoritmus atbilstoši krājumu kontrolei, papildināšanas politiku, lai izvairītos no krājumu nepietiekama daudzuma situācijām, vienlaikus samazinot krājumu līmeni [58, 62].

Piedāvātā Krājumu vadības aģenta uzvedības algoritma apraksts ir šāds: dinamiski pārvalda izejvielu un gatavās produkcijas pietiekamību ražošanai un pārdošanai. Katrai izejvielai un gatavajai produkcijai izskaitļo:

- 1) piederību ABC analīzes klasei;
- 2) pieprasījumu prognozi;
- 3) drošības krājumus;
- 4) pasūtīšanas punktus.

Pēc katra jauna pieprasījuma notiek **pieprasījuma salīdzināšana** ar prognozēto pieprasījumu. Atbilstoši rezultātam aģents pārrēķina drošības krājumus un pasūtīšanas punktu. Piederība pie ABC analīzes klasēm un pieprasījuma prognoze tiek pārrēķinātas, iekļaujot jaunus pieprasījuma datus.

ABC analīze ir pamata piegādes ķēdes vadības paņēmieni, ko bieži izmanto krājumu/izejvielu menedžeri, un tas ir sākuma punkts krājumu kontrolē. ABC analīze ir kategorizēšanas sistēma, un šīs analīzes rezultātā krājumi tiek klasificēti trijās klasēs, katrai klasei ir atšķirīga vadības kontrole. ABC analīzes pamatā ir Pareto analīze, kurā ir noteikts, ka 20 % produkcijas veido 80 % pārdošanas apjomu.

Pieprasījuma prognozēšana šajā kontekstā ir produktu paredzamā pieprasījuma prognozēšana vai novērtēšana noteiktā nākotnes laika posmā. Pastāv plašs prognozēšanas algoritmu klāsts, un tos visus var analizēt nākotnē. Promocijas darbā apskatītas un izstrādātajā daudzāģentu sistēmā tika iekļautas šādas prognozēšanas metodes: vidējā metode, naivā metode, svērtais slīdošais vidējais un eksponenciālā izlīdzināšana (1.).

$$\hat{y}_{T+1|T} = \alpha y_T + \alpha(1 - \alpha)y_{T-1} + \alpha(1 - \alpha)^2 y_{T-2} + \dots, \quad (1.)$$

kur α – izlīdzināšanas parametrs ($0 < \alpha < 1$).

Izstrādātajai daudzāģentu sistēmai tika izvēlēta politika Ekonomiskā pasūtījuma daudzums – atkārtotās pasūtīšanas punkts.

Iepirkuma aģenta izstrādāšana

Promocijas darbā pieņemts, ka piegādātajam izejmateriāli, kas nepieciešami ražotājam, ir neierobežotā daudzumā un var tikt piegādāti bez kavēšanās. Piegādātāja aģents un Iepirkuma aģents (no ražotāja) sazinās, izmantojot *RažotājaPiegādātāja* ontoloģiju, lai vienādi saprastu sarunu.

Iepirkuma aģents nodarbojas ar izejvielu iepirkšanu no piegādātājiem. Sākotnēji Iepirkuma aģents ir dīkstāvē. Kad izejvielu daudzums sasniedz pasūtīšanas punktu, tiek aktivizēta tā darbība.

- Nepietiekama izejvielu daudzuma gadījumā: nosūtīt pieprasījumu Piegādātāja aģentam(-iem), kurš(-i) piegādā izejvielas.
- Ja Piegādātāja aģenta piedāvātā cena un piegādes laiks ir pieņemami, apstiprināt piedāvājumu, ja nē – noraidīt to.
- Kad pasūtītā izejviela tiek nosūtīta ražotājam, Iepirkuma aģents nonāk gaidīšanas režīmā līdz nākamajai situācijai ar nepietiekamu izejvielu daudzumu.

Iepirkuma aģents ir atbildīgs par piegādātāju izvēli: ar minimālām izejvielu cenām, maksimāli augstāko kvalitāti un maksimāli ātrākajām piegādēm.

Ontoloģiju izstrādāšana

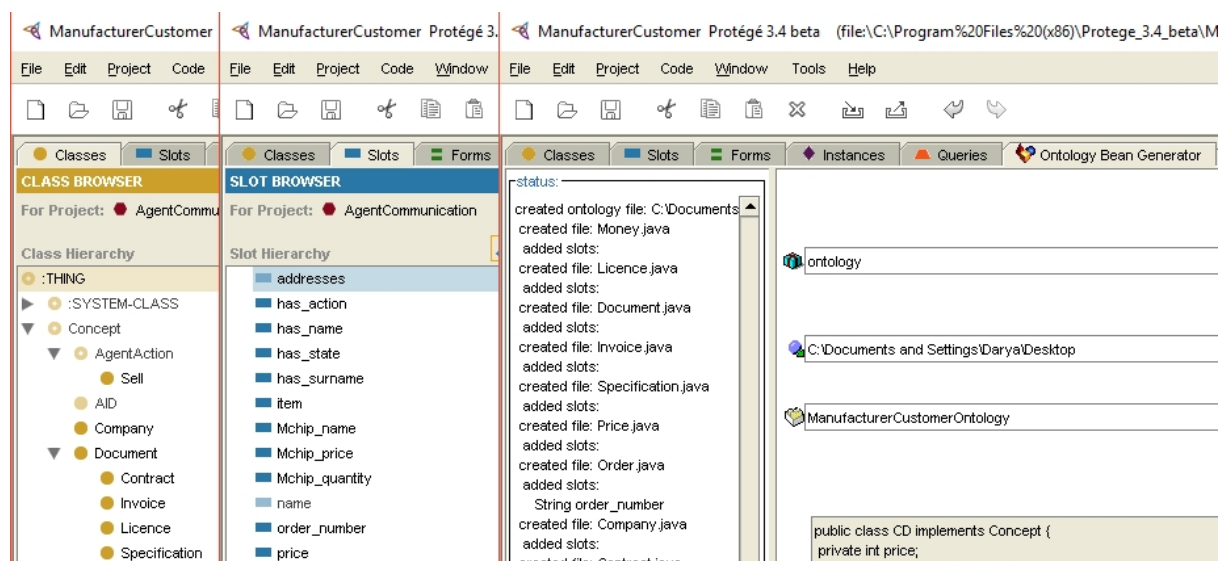
Zināšanu apmaiņa starp piegādes ķēdes dalībniekiem var saskarties ar šādiem šķēršļiem: konfidencialitāte, uzticība un standarti [78]. Savukārt promocijas darbā tiek piedāvāta informācijas koplietošana kā līdzeklis informācijas apmaiņai un apstrādei starp viena mezgla

aģentiem un ontoloģijas starpmezglu saziņai, izmantojot vienādu informācijas aprakstu formālā veidā.

Izstrādātajā sistēmā ir divas dažādas ontoloģijas piegādes ķēdes starpmezglu mijiedarbībai: *RažotājaPiegādātāja* ontoloģija un *RažotājaPircēja* ontoloģija. Tās tiek izmantotas aģentu saziņai *JADE* ietvarā.

Aģentu ontoloģijas uzbūve atšķiras no parastās ontoloģijas uzbūves: tai nepieciešama abstrakta koncepcija *AgentAction* un abstrakta koncepcija *Predicate*.

Autore, iedvesmojoties no ontoloģijas novērtēšanas pieejas, kas balstīta datu avotā, piedāvā izveidot ontoloģiju, pamatojoties uz Piegādātāju un Iepirkuma aģentu uzvedību aprakstu šim uzdevumam. Abstrakti to var raksturot šādi: ir nepieciešams pirkt izejvielas *RM* daudzumā *Q* par iespējami minimālu cenu un ar īsāko sagatavošanās laiku; šis pieprasījums ir jānumurē. Šo uzvedību var parādīt ar ontoloģiskām koncepcijām Piegādātāju un Ražotāju komunikācijai: *RawMaterials* ar apakšklasēm *RawMaterial1*, *RawMaterial2*. *AgentAction* koncepcija ir *Buy*, kas apraksta aģenta sarunas mērķi. *Predicate* koncepcija ir *Costs*, kas raksturo izejvielu cenu *price*, kur cena ir slots ar *float* vērtības tipu. Ir arī nepieciešama koncepcija *Documents* ar apakšklasi *Invoice*. *RažotājaPircēja* ontoloģijas izstrādāšana ir līdzīga *RažotājaPiegādātāja* ontoloģijai to veicamo uzdevumu dēļ (3.5. att.).



3.5. att. *RažotājaPircēja* ontoloģijas izstrādāšana izmantošanai *JADE* ietvarā.

Autore piedāvā šai ontoloģijai izmantot uz pielietošanu balstītu novērtēšanas pieeju.

Saskarnes izstrādāšana sākotnējo datu ievadišanai daudzāģentu sistēmā

Promocijas darba pētījuma sākumā, izstrādājot daudzāģentu sistēmu, kur mijiedarbība starp aģentiem, arī starp viena mezgla aģentiem, tika realizēta ar ontoloģijām, ražošanas mezgla ontoloģijā tika apkopotas aģentu uzvedības, risināmie uzdevumi un aģentu sazināšanās cēloņi. Šajā ontoloģijā tika iekļauta visa informācija par katru aģentu, tā mērķa sasniegšanai un uzdevumu izpildei.

Iepirkuma process tika aprakstīts iepriekš, komunikācijas ar piegādātājiem laikā Iepirkuma aģents noformē savu “sarakstu” par piegādātājiem ražotāja ontoloģijā. Šajā

sarakstā ir uzņēmuma nosaukums, pasūtītās izejvielas un to daudzums, katra pasūtījuma piegādes laiks. Tiek aprēķināts katra uzņēmuma minimālais un maksimālais izpildes laiks. Tas var palīdzēt lēmumu pieņemšanā par piegādātāju termiņa ierobežojuma gadījumā.

Krājumu vadības aģentam ir šādi dati: ražojamo produktu prioritātes līmenis; prognozēšanas rezultāti; papildināšanas politika.

Ražošanas aģenta darbībai jāsniedz šāda informācija: ražošanas iekārtu jauda; ražošanas procesu apraksts; ražošanas procesa izpildes laiks; nepieciešamo izejvielu daudzumi, kas ir vajadzīgi gatavā produkta ražošanai.

Pārdošanas aģents izveido sarakstu, kas līdzīgs Iepirkuma aģenta sarakstam, un tajā ir klienti, iegādātās preces, pakalpojumu līmenis, prioritātes līmenis un ražotāju apmierinātība ar viņu sadarbību.

Pētījuma rezultātā radās ideja **ontoloģijā balstītas saskarnes izstrādei** sākotnējo datu ievadīšanai daudzagentu sistēmā, katru situāciju uzskatot par jaunu ontoloģijas gadījumu un izveidojot ražotāja ontoloģiju.

Aģentu darbības ir definētas daudzagentu sistēmas katra aģenta uzvedībā, un visas aģentu darbības, izņemot ražošanu, ir identiskas dažādiem sistēmas lietojumiem. Ražošanas process ir konkrētā lietojuma iezīme.

Ražošanas procesa apraksts ļāva secināt, ka katrs atsevišķs gadījums var būt ražošanas ontoloģijas **indivīds**, un aģenti savā darbībā izmantos pievienotu informāciju.

Ražošanas procesa aprakstā ietilpst ražošanas darbību secība un ražošanas partijas apstrādes laiki. Izejvielu nosaukumi un daudzumi ir nepieciešami, lai gatavu produktu saražotu atbilstoši tā ražošanas tehnoloģijai. Katra gadījuma individuālās ražošanas tehnoloģijas apraksts formulē zemāka līmeņa ontoloģiju, augšējā līmeņa ontoloģija formulē priekšmeta apgabala ražošanas ontoloģiju turpmākai atkārtotai izmantošanai. Domēna ontoloģiju var attēlot lietotāja saskarnē, kas redzama 3.6. att.

The screenshot shows a software interface titled "Design Preview [Interface]". It contains a form with the following fields and buttons:

- Production process
- Product: [text input] [Add new product]
- Batch max quantity: [text input]
- Production template: [text input]
- Operation: [text input] [Add new operation]
- Duration of operation: [text input]
- Equipment needed: [text input] [Add new equipment]
- Capacity of equipment: [text input]
- Personnel required: [text input] [Add new personnel]
- Raw material needed: [text input]
- Quantity of raw material: [text input] [Add new raw material]
- [New] [Reset]
- Raw material data base: [Add] [Save]
- Products data base: [Add]
- Data on previous sale: [Add] [EXIT]

3.6. att. Domēna ontoloģijas reprezentācija lietotāja saskarnē.

Šis atsevišķā gadījuma apraksts nodrošina Ražošanas aģentu ar datiem, kas nepieciešami tā darbībai. Izejvielu datubāzes, gatavās produkcijas datubāzes un iepriekšējo pārdošanas apjomu datu pievienošana izveido daudzāģentu sistēmu ar konkrētiem datiem.

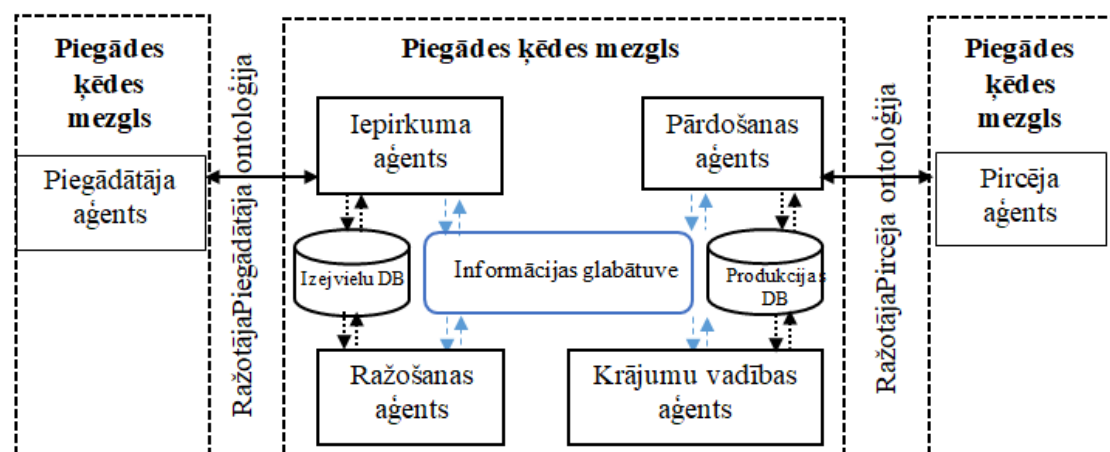
Daudzaģentu sistēmas arhitektūras izstrādāšana

Izstrādāto daudzāģentu sistēmu var izmantot dažādiem uzņēmumiem, kuru uzdevums ir dažādu izejvielu vai produktu iegāde, iespējams, to pārveidošana gatavā produkcijā un tālāka pārdošana, vienlaikus cenšoties samazināt uzglabāšanas un ražošanas/pārveidošanas izmaksas.

Izstrādātās sistēmas darbībai tiek piemērotas šādas integrācijas prasības:

- 1) Ražošanas aģenta izmantošanai ir nepieciešams ražošanas procesa apraksts – procesu secība, nepieciešamās izejvielas, ražošanas laiks, ražošanas iekārtu jauda utt.; šī informācija tiek ievadīta lietotāja saskarnē;
- 2) Iepirkuma darbībai ir nepieciešama piekļuve izejvielu datubāzei/uzskaitei;
- 3) Krājumu vadības aģenta darbībai nepieciešami iepriekšējo periodu pieprasījumu dati;
- 4) Krājumu vadības aģentam un Pārdošanas aģentam ir jānodrošina piekļuve gatavas produkcijas datubāzei/uzskaitei.

Pēc piedāvātās pieejas izveidotā atkārtoti izmantojamā daudzāģentu sistēma redzama 3.7. att. Tājā ir seši aģenti, no kuriem četri ir ražotāja aģenti, piektais aģents pārstāv piegādātāja Pārdošanas aģentu (Piegādātāja aģents), un tas ir izstrādāts kā Pārdošanas aģents. Sestais aģents pārstāv pircēja Iepirkuma aģentu (Pircēja aģents), šis aģents ir izstrādāts kā Iepirkuma aģents.



3.7. att. Izstrādātās daudzāģentu sistēmas galīgais izskats.

Izstrādātās daudzāģentu sistēmas lietošana sākas ar lietotāja saskarnes aizpildīšanu, pēc tam – individuālu daudzāģentu sistēmas izpildi *JADE* ietvarā.

Daudzaģentu sistēmas infrastruktūra un ierobežojumi

Izstrādātās daudzāģentu sistēmas izveidošanai tika izmantoti: *Java*, *JADE* ietvars, ontoloģijas redaktors *Protégé* un tā iebūvētais *Ontology Bean Generator* modulis, *MySQL*

datubāzes atbalstam, *Apache Ant* programmas koda apkopošanai un *NetBeans IDE* kā integrēta izstrādes vide.

Izstrādājot daudzāģentu sistēmu, tika paredzēta atteikšanās, kas ir vērsta uz nepārtrauktu sistēmas pieejamību, ka arī atkopšanas laika novēršanu [99].

Trešās nodaļas secinājumi

1. Aģentu daudzums daudzāģentu sistēmā ietekmē sistēmas darbības efektivitāti.
2. Izstrādātā saskarne sākotnējo datu ievadīšanai daudzāģentu sistēmā ļauj lietot izstrādāto daudzāģentu sistēmu atkārtoti, katram atsevišķam gadījumam aprakstot ražošanas procesus ar nepieciešamo iekārtu un darbinieku jaudu, nepieciešamajām izejvielām un izpildes laiku katrai ražošanas produkta operācijai.
3. Izstrādātā daudzāģentu sistēma var izpildīt piegādes ķēdes funkcijas, vienlaikus piedāvājot krājumu samazināšanu un ražošanas procesu uzlabošanu.

Šī daudzāģentu sistēma ir izstrādāta, to var modificēt un attīstīt, ja šāda nepieciešamība radīsies. Šīs modifikācijas un attīstīšanas piemērs ir aprakstīts nākamajā nodaļā.

4. IZSTRĀDĀTĀS DAUDZĀĢENTU SISTĒMAS ATTĪSTĪŠANA

Šī nodaļa ir veltīta izstrādātās daudzāģentu sistēmas attīstīšanas iespējām. Ja radīsies nepieciešamība attīstīt izstrādāto daudzāģentu sistēmu, piemēram, ar jauniem efektivitātes rādītājiem vai jaunu funkcionalitāti, tad šo daudzāģentu sistēmu var paplašināt. Var būt arī otrādi, ja radīsies nepieciešamība izmantot samazinātu aģentu skaitu, piemēram, bez ražošanas, tad izstrādāto daudzāģentu sistēmu var samazināt līdz nepieciešamo aģentu kopai. Šajā nodaļā parādīts, kā var attīstīt daudzāģentu sistēmu: pirmkārt, jauna aģenta izstrādāšana, otrkārt, jauna efektivitātes rādītāja pievienošana daudzāģentu sistēmā, treškārt, esošā aģentu skaita samazināšana.

Jauna aģenta ieviešana daudzāģentu sistēmā

Izstrādātajā daudzāģentu sistēmā ir atspoguļotas piegādes ķēdes pamatfunkcijas un pieņemts, ka iekšējā transportēšana nav iekļauta. Tomēr var gadīties, ka šīs iekšējās transportēšanas nozīme ir samērā svarīga.

Transportēšanas aģenta mērķis ir samazināt pārvietošanas laiku, izvairoties no liekām un bezjēdzīgām darbībām. Transportēšanas aģenta uzdevums ir piedāvāt ātrāko, nevis īsāko, ceļu no vienas iekārtas līdz otrai, vienlaikus fiksējot detaļu un izejvielu pārvietošanu no izejvielu noliktavas uz ražošanas iekārtām, un transportēt gatavus produktus uz gala produkcijas noliktavu.

- Sākotnēji Transportēšanas aģents ir dīkstāvē; kad Ražošanas aģents izveido jaunu ražošanas pasūtījumu, Transportēšanas aģents fiksē no noliktavas paņemto izejvielu daudzumu un turpina savu darbību līdz gatavas produkcijas transportēšanai uz noliktavu.
- Katra pasūtījuma izpildei tiek paņemtas izejvielas no noliktavas un tiek fiksēts sākotnējais laiks.

- Transportēšanas aģentam ir zināma ražošanas operāciju secība, un tam ir zināmas atrašanās un mērķa vietas; Transportēšanas aģents aprēķina to ātrāko sasniegšanas ceļu.
- Tiek fiksēts katra ražošanas secības posma sākumlaiks, un, kad tiek pabeigts katrs ražošanas secības posms, tiek fiksēts beigu laiks.
- Pēdējā ražošanas posmā fiksē gatavās produkcijas ražošanas laiku, un gatavā produkcija tiek transportēta uz gala produkcijas noliktavu.

Transportēšanas aģentam nav nepieciešama sadarbība ar citiem aģentiem, tas tiek palaists kopā ar Ražošanas aģentu, izstrādātās daudzāģentu sistēmas (3.3. att.) katrā mezglā ir pieci aģenti.

Jauna efektivitātes rādītāja ieviešana daudzāģentu sistēmā

Jauns efektivitātes rādītājs varētu būt energoefektivitāte, taču, pievienojot Transportēšanas aģentu, tiek sagaidīts produktīvs ražošanas laiks – tīrā ražošanas laika atkarība no galīgā ražošanas laika (ražošanas laiks un transportēšanas laiks).

Saņemot rezultātu, var analizēt kopējo iekārtu efektivitāti. Kopējā iekārtu efektivitāte (*OEE, Overall Equipment Efficiency*) ir zelta standarts ražošanas produktivitātes mērīšanai. *OEE* ir faktiskās izlaides rādītājs, kas iegūts ar iekārtu, salīdzinot ar maksimālo jaudu, ko tajā pašā laika posmā var sagaidīt no šīs iekārtas. *OEE* ir standarta metrika, ko izmanto, lai novērtētu ražošanas veiktspēju, ar plašu skatu uz visiem ražošanas aspektiem. Izmantojot šos trīs faktoros, *OEE* nodrošina ražotājam vislabāko iekārtu izmantošanas rādītāju un palīdz koncentrēties uz uzlabojumiem, kas vistiešāk ietekmē viņu peļņu.

Aģenta izņemšana no daudzāģentu sistēmas

Gadījumā, ja nav nepieciešams kāds no aģentiem, to no daudzāģentu sistēmas var izņemt. Piemēram, ja daudzāģentu sistēmu lieto starpnieks: nopērk precī, izmaina cenu un pārdod tālāk. Šajā gadījumā nav nepieciešama ražošana un krājumu vadība.

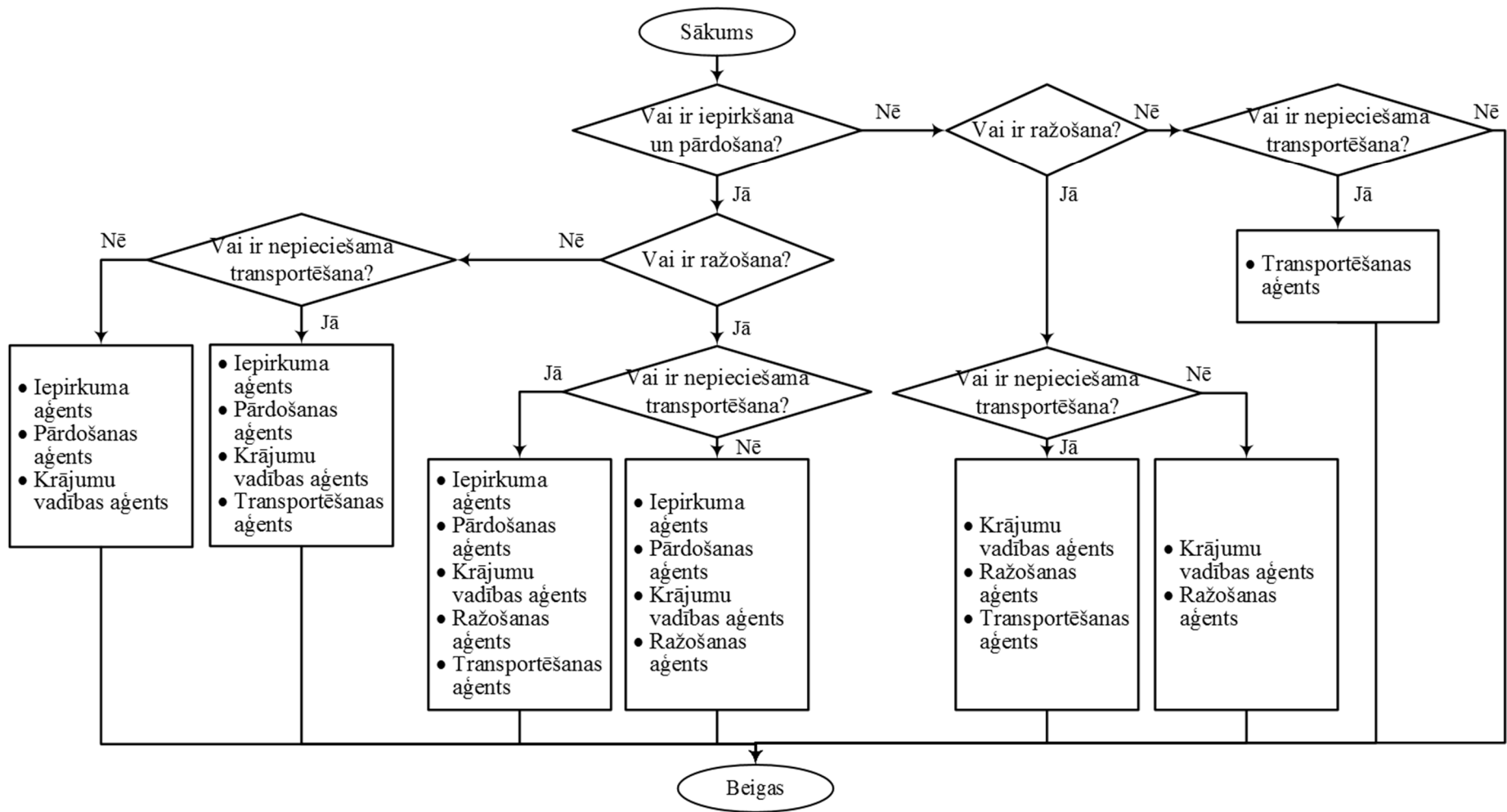
Tātad, daudzāģentu sistēmā ir divi aģenti: Iepirkuma un Pārdošanas. To darbībām daudzāģentu sistēmā ir nepieciešami dati, kas apkopoti 4.1. tabulā.

4.1. tabula

Daudzāģentu sistēmas prasības

Aģents	Prasības
Iepirkuma aģents	Pieklūve izejvielu datubāzei
	Piegādātāju saraksts
Pārdošanas aģents	Pircēju saraksts
	Pieklūve gatavās produkcijas datubāzei

Ja tomēr ir nepieciešamība pilnveidot sistēmu ar krājumu vadību vai situācijās, kurās tiek izmantotas noliktavas, ir jāizmanto arī krājumu vadība, kas tiek realizēta ar Krājumu vadības aģenta palīdzību.



4.1. att. Nepieciešamā aģentu skaita noteikšanas procedūra.

Izstrādātās daudzāģentu sistēmas lietošanas apraksts

Pirms daudzāģentu sistēmas katra jauna gadījuma lietošanas sākuma ir jāveic pieci daudzāģentu sistēmas pielāgošanas soļi.

1. Atkarībā no pētāmā uzņēmuma darbības sfēras nepieciešams definēt nepieciešamo aģentu skaitu, to var izdarīt uzņēmuma darbinieks, izpildot nepieciešamā aģentu skaita noteikšanas procedūru (4.1. att.):
 - ja uzņēmums ir starpnieks, ir nepieciešami šādi aģenti: Iepirkuma aģents piegādātāju izpētei un izvēlei; Pārdošanas aģents tirdzniecības procesa organizēšanai; Krājumu vadības aģents krājumu samazināšanai;
 - ja uzņēmums veic ražošanu vai montāžu, ir jāizmanto arī Ražošanas aģents;
 - ja uzņēmumam ir pārvadājumi un jāatrod ātrākais ceļš no vienas vietas uz citu, ir jāizmanto arī Transportēšanas aģents.
2. Tiek palaista lietotāja saskarne; ja nav ražošanas vai montāžas, jāpievieno piekļuve izejvielu un gatavās produkcijas datiem un iepriekšējās pārdošanas datiem. Pretējā gadījumā ir nepieciešams ievadīt individuālā gadījuma ražošanas procesa aprakstu, pamatojoties uz piedāvāto struktūru.
3. Nākamais solis ir *JADE* izpilde.
4. Pēc daudzāģentu sistēmas palaišanas Krājumu vadības aģents veic pirmo darbību, lai definētu esošo situāciju, noteiktu prioritātes un analizētu krājumus.
5. Pēc tam pārējie aģenti sāk darbību atbilstoši saviem mērķiem un uzvedībai.

Ceturtās nodaļas secinājumi

5. Izstrādāto daudzāģentu sistēmu var pilnveidot un attīstīt jebkurā laika momentā pēc nepieciešamības, nevis katram jaunam pielietojumam izstrādāt jaunu daudzāģentu sistēmu;
6. Daudzāģentu sistēmu var pilnveidot ar jaunu funkcionalitāti, pievienojot jaunu aģentu vai efektivitātes rādītāju, vai otrādi: izņemt aģentu no daudzāģentu sistēmas, ja šāda nepieciešamība radīsies.

Nākamais solis ir izstrādātās daudzāģentu sistēmas aprobācija uz reālā uzņēmuma datiem un tās pielietojšanas efektivitātes novērtēšana.

5. IZSTRĀDĀTĀS DAUDZĀĢENTU SISTĒMAS IZMANTOŠANA

Nodaļā aprakstīta izstrādātās daudzāģentu sistēmas lietošana piegādes ķēdes vadībai. Sākumā tiek apskatīts ražošanas uzņēmums, tā ražošanas specifika, pieejamie dati un uzņēmumā eksistējošās situācijas analīze. Tālāk tiek parādīta daudzāģentu sistēmas izveidošana attiecīgi aprakstītajai pieejai. Nodaļā tiek apskatīta arī katra atsevišķā aģenta darbība, kā arī to mijiedarbība un daudzāģentu sistēmas lietošana laikā no viena līdz trim mēnešiem, analizējot iegūtos rezultātus un rezultātus, kas saņemti par cilvēka darbību. Nodaļas beigās veikts daudzāģentu sistēmas izmantošanas efektivitātes novērtējums pēc definētiem efektivitātes kritērijiem.

Izstrādātās daudzāģentu sistēmas aprobācija ražošanas uzņēmumā

Daudzāģentu sistēma tiek lietota ražošanas uzņēmumā, kas nodarbojas ar mikroshēmu ražošanu un to tālāku pārdošanu. Šim pētījumam ir pieejami dati par ražošanas specifiku un tehnoloģiju, kā arī pārdošanas, iepirkšanas un ražošanas apjomu dati.

Ražošanas procesa specifika ir šāda: mikroshēmas tiek saražotas, izmantojot atbilstošu aprīkojumu un personāla darbu; visus produktus var iedalīt vairākās grupās pēc vienas un tās pašas ražošanas veidnes. Katrā ražošanas veidnē tiek izmantots viens un tas pats aprīkojums un personāls. Tas nozīmē, ka dažāda veida mikroshēmas var gaidīt vienā rindā, lai tās saražotu, izmantojot vienu un to pašu aprīkojumu. Tāpēc viens no galvenajiem jautājumiem ir atrast produkcijas ražošanas secību, lai samazinātu gaidīšanas laiku un kopējo ražošanas laiku.

Pētījuma sākumā ražošana notika režīmā – ražot noliktavā, šādi palielinot krājumus un krājumu uzglabāšanas izmaksas. Savukārt pasūtījums var būt arī produkcijai, kas nav piejama noliktavā, piemēram, jaunai produkcijai vai produkcijai, kas nav pieprasīta jau ilgāku laiku. Ražotāja produkcija ir specifiska, līdz ar to pircējs ir gatavs gaidīt savu pasūtījumu, un pasūtījuma sagatavošana piegādei notiek vidēji viena mēneša laikā. Ražošanas kapacitāte neļauj laikus (vidēji viena mēneša laikā) saražot visu produkciju pieprasītajos daudzumos, t. i., ražot pēc pieprasījuma, tātad krājumi ir nepieciešami, taču ir tie jāparvalda, iekļaujot arī pieprasījumu prognozēšanu.

Ražošanas produkcijas apjoms, kam fiksēti pārdošanas apjomi, pētījuma gadā ir 56 gab., citās 73 pozīcijās ir senāki izstrādājumi, kas atrodas gatavo preču noliktavā un, iespējams, nekad netiks izpirkti veco ražošanas datu dēļ, vai arī šī produkcija tika saražota pētniecības vajadzībām; savukārt izejvielu daudzums ir 27 gab.

Pētījumam ir pieejami dati par 17 mēnešiem, 14 mēnešu dati tiek izmantoti analīzei, pēdējo trīs mēnešu dati ir rezervēti izstrādātās sistēmas veiktspējas pārbaudei.

Ražošanas process ir pilnībā aprakstīts, to var izmantot daudzāģentu sistēmas izveidei. Aprakstīts ir arī ražošanai nepieciešamais aprīkojums un atbilstošais personāls. Sākotnējie dati par izejvielu daudzumu un produktu krājumu līmeni ir jāiekļauj sistēmā. Tiek sniegti arī dati par iepriekšējiem pārdošanas apjomiem, kas nepieciešami analīzei, tie, kā arī iepriekš minētā informācija, ir jāievada daudzāģentu sistēmā.

Izstrādātās pieejas lietošanas aprakstā pirmais solis ir nepieciešamo aģentu noteikšana. Izejot cauri piedāvātai aģentu daudzuma noteikšanas procedūrai (4.1. att.), tika definēts, ka ir nepieciešami šādi aģenti: Iepirkuma; Krājumu vadības; Ražošanas; Pārdošanas; Transportēšanas.

Izstrādātā lietotāja saskarne ļauj ievadīt pieejamo informāciju daudzāģentu sistēmā, lai veiktu turpmāko analīzi un strādātu ar to. Kad lietotāja saskarne ir aizpildīta ar ražošanas procesa datiem, dati par iepriekšējiem pārdošanas apjomiem ir atbilstošajā formā un gatavās produkcijas krājumu līmenis sākumpunktā ir pievienots sistēmai, daudzāģentu sistēma ir izveidota.

Daudzāģentu sistēmas darbības realizācija un analīze

Pirmā Krājumu vadības aģenta izpilde ABC analīzē atklāja, ka 11 produkti (20 %) veido 72 % no kopējās peļņas. Pirmie 20 % formulē A klasi un ir viskritiskākie. Šīm precēm nepieciešama stingra krājumu kontrole, bieža pieprasījuma prognožu un izmantošanas likmju pārskatīšana, ļoti precīzi partiju dati un bieža ciklu uzskaitē; šo produktu daudzumi ir rūpīgi jākontrolē.

Nākamie 30 % produktu nes 15 % pārdošanas ieņēmumu un pieder B klasei. Šīm precēm nepieciešama obligāta krājumu kontrole, neregulāra pieprasījuma prognožu un izmantošanas likmju pārskatīšana, saprātīgi precīzi dati par detaļām un retāka, bet regulāra, ciklu skaitīšana, kā arī tie būtu rūpīgi jākontrolē, jo tie var kļūt par A klases produktiem.

Gandrīz puse no produkcijas nes tikai 5 % pārdošanas ieņēmumu un pieder C klasei. Šiem produktiem ir vismazākā ietekme uz noliktavas darbību un finanšu rādītājiem, tāpēc tiem nepieciešama minimāla krājumu kontrole. ABC analīzes rezultāti apkopoti 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Pirmie ABC analīzes rezultāti pēc daudzāģentu sistēmas palaišanas (fragments)

Produkcija	Summa, €	% no kop.	Kum, %	Rangs	ABC analīzes rezultāts
<i>MChip17</i>	253392,65	17,27	17,27	1	A
<i>MChip22</i>	194404,77	13,25	30,52	2	A
<i>MChip12</i>	129759,02	8,84	39,36	3	A
<i>MChip2</i>	84182,60	5,74	45,1	4	A
<i>MChip6</i>	81483,58	5,55	50,65	5	A
<i>MChip1</i>	61195,88	4,17	54,82	6	A
...					
<i>MChip37</i>	37556,40	2,56	74,28	12	B
<i>MChip43</i>	37555,20	2,56	76,84	13	B
<i>MChip21</i>	35632,95	2,43	79,26	14	B
...					
<i>MChip39</i>	0	0	100,00	56	C

Pēc ABC analīzes Krājumu vadības aģents aprēķina produktu pieprasījumu nākotnē, drošības krājumus un pasūtīšanas punktu (5.2. tab).

5.2. tabula

Pasūtījumu prognozēšanas, drošības krājumu, pasūtīšanas punktu rezultāti A klases produkcijai

Produkcija	Kopā	Pieprasījums	Drošības krājumi	Pasūtīšanas punkts
<i>MChip17</i>	10375	1397	1714	3111
<i>MChip22</i>	12406	100	4033	4133
<i>MChip12</i>	20722	9521	9840	19361
<i>MChip2</i>	5915	0	1299	1299
<i>MChip6</i>	5478	0	1642	1642
<i>MChip1</i>	69	194	228	422
<i>MChip47</i>	5671	9297	6388	15685
<i>MChip14</i>	7004	390	2692	3082
<i>MChip53</i>	753	7	692	699
<i>MChip54</i>	131	19	59	78
<i>MChip38</i>	581	480	929	1409

Kā redzams 5.2.tabulā, ir divas pozīcijas, kas ir zemākas par pasūtījuma punktu, un nav pietiekams daudzums prognozētajam pieprasījumam, tas nozīmē, ka tās ir jāsarāžo.

Krājumu vadības aģents atklāja, ka divi A klases produkti nevar apmierināt prognozēto pieprasījumu. A klases produkti nozīmē augstāko prioritātes līmeni, un to krājumam jābūt pietiekamam.

Eksperimentu plāns

Tika apskatīts, kā strādā katrs aģents atsevišķi un visi aģenti kopā. Nākamais mērķis ir pārbaudīt, vai daudzģentu sistēmas lietošanas rezultāti sniegs labākus rezultātus, nekā pastāvošās uzņēmuma sistēmas darbība bez tās. Eksperimentu plāns izstrādātai daudzģentu sistēmai ir šāds:

- 1) dažādu pircēju pieprasījumu apstrāde;
- 2) izvēle starp dažādiem piegādātājiem;
- 3) daudzģentu sistēmas darbība pirmā mēneša laikā un tās analīze;
- 4) daudzģentu sistēmas darbība otrā mēneša laikā un tās analīze;
- 5) daudzģentu sistēmas darbība trešā mēneša laikā un tās analīze.

Šim pētījumam analīzei tika izmantoti 14 mēnešu dati (prognozēšanai, ABC analīzei), un efektivitāte tika pārbaudīta trīs mēnešiem (pēdējie trīs no 17 mēnešiem, kas ir pieejami pētījumam): cilvēka darbības rezultāti ar tādiem pašiem sākumdatiem ir zināmi, ir jāpārbauda daudzģentu sistēmas efektivitāte.

Eksperimentu plānā ir arī papildu eksperiments, tā mērķis ir pārbaudīt daudzģentu sistēmu izmantojot uzņēmuma datus, taču par mazāku laika periodu: deviņi mēneši – analīzei; astoņi mēneši – darbības analīzei.

Dažādu pircēju pieprasījumu apstrāde

Šajā eksperimentā tiek apskatīta dažādu pircēju apkalpošana, kas notiek vienlaikus. Tika apskatīta situācija, kad ražošanas uzņēmumā vienā laika momentā pienāk dažādi pieprasījumi. Šādā dažādu pircēju apkalpošanas eksperimentā tika pasūtītās dažādas preces.

Eksperimenta laikā tika parādīts, ka Pārdošanas aģents spēj ātri reaģēt uz pircēju pieprasījumiem – aģents to izdara mazāk nekā vienas minūtes laikā, savukārt cilvēks apstrādā pasūtījumu līdz 1 darba dienai atkarībā no darbinieka noslodzes pieprasījuma saņemšanas laikā.

Izvēle starp dažādiem piegādātājiem

Šajā eksperimentā ir parādīta Iepirkuma aģenta piegādātāja izvēle. Ja nepieciešamās izejvielas ir vairākiem no tiem, tad jāizvēlas labākais variants – lētākās izejvielas un to piegāde, nezaudējot kvalitāti. Tika apskatīti divi piegādātāji ar vienādu izejvielu kvalitāti, bet ar dažādām iepirkšanas un piegādes cenām. Iepirkuma aģentam bija jāizvēlās piegādātājs, kurš piedāvās labāku cenu, ar nosacījumu, ka izejvielu kvalitāte ir vienāda.

Tika apskatītas divas situācijas, kad otrais piegādātājs (Piegādātājs2) iesniedza labāku piedāvājumu un kad pirmais piegādātājs (Piegādātājs1) piedāvāja izdevīgākus nosacījumus izejvielu iegādei. Abās reizēs tika izvēlēts ražošanas uzņēmumam labākais variants, jo tiek gaidīti dažādi piedāvājumi, tie tiek salīdzināti un tiek izvēlēta labākā alternatīva.

Daudzģentu sistēmas darbība pirmā mēneša laikā un tās analīze

Eksperimenta mērķis ir skaitliski pārbaudīt daudzģentu sistēmas darbības efektivitāti, salīdzinot ar cilvēka darbību, strādājot ar vienādiem sākumdatiem.

Daudzaģentu sistēmas pirmā lietošana sākas ar Krājumu vadības aģenta inicializāciju, lai analizētu pieejamos krājumus un prognozētu nākotnes pasūtījumus izstrādātai ražošanai. ABC analīzes rezultāti apkopoti 5.1. tabulā. Krājumu vadības aģenta darbība nodrošina pieprasījuma prognozēšanu, drošības krājumu un pasūtīšanas punktu definēšanu.

Pēc Krājumu vadības aģenta darbības un saņemtajiem rezultātiem tika aktivizēts Ražošanas aģents. Ražošanas aģenta darbības rezultātā un Pārdošanas aģenta darbības rezultātā pieprasījums tika izpildīts. Daudzaģentu sistēmas rezultāti tika salīdzināti ar cilvēka darbības rezultātiem (5.3. tab.). Pieprasījums ir apmierināts abos gadījumos – gan daudzģentu sistēmas, gan cilvēku darbības rezultātā.

5.3. tabula

Pirmā mēneša rezultātu salīdzinājums

Sākumdati par krājumiem noliktavā	1. mēnesis	
	Daudzaģentu sistēmas darbības rezultāts	Cilvēka darbības rezultāts
172403	148413	155531

Iegūtie rezultāti liecina, ka pēc pirmā mēneša daudzģentu sistēmas darbības noliktavā uzglabātais daudzums samazinājies, salīdzinot ar cilvēka darbības rezultātu, kas savukārt samazina uzglabāšanas izmaksas.

Daudzaģentu sistēmas darbība otrā mēneša laikā un tās analīze

Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt daudzģentu sistēmas darbību pēc otrā darbības mēneša, salīdzinot ar cilvēka darbības rezultātiem. Daudzaģentu sistēmas rezultāti pirmajā mēnesī, t. i., produkcijas krājumu līmeņi, tiek izmantoti kā otrā mēneša sākumdati.

Otrā mēneša daudzģentu sistēmas darbības rezultāta salīdzinājums ar cilvēka darbības rezultātu apkopots 5.4. tabulā. Pieprasījums ir apmierināts abos gadījumos – gan daudzģentu sistēmas, gan cilvēka darbības rezultātā, atšķirība ir gatavās produkcijas krājumu līmeņi.

5.4. tabula

Pirmo divu mēnešu darbības rezultāti

Sākumdati par krājumiem noliktavā	1. mēneša rezultāts		2. mēneša rezultāts	
	Daudzaģentu sistēmas darbības rezultāts	Cilvēka darbības rezultāts	Daudzaģentu sistēmas darbības rezultāts	Cilvēka darbības rezultāts
172403	148413	155531	135550	176903

Pēc diviem mēnešiem var secināt, ka daudzģentu sistēmas darbības rezultātā krājumi noliktavā samazinās, joprojām izpildot pircēju pieprasījumu laikus un pilnā apmērā. Savukārt otrā mēneša laikā cilvēka darbības rezultātā noliktavas krājumi palielinās, salīdzinot ar pirmā mēneša rezultātiem. Pēc iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka daudzģentu sistēmas darbības rezultāti ir labāki.

Daudzaģentu sistēmas darbība trešā mēneša laikā un tās analīze

Par trešā mēneša sākumdatiem daudzģentu sistēmai tiek pieņemti krājumu līmeņi pēc otrā mēneša daudzģentu sistēmas darbības.

Pieprasījums ir apmierināts abos gadījumos – gan daudzģentu sistēmas, gan cilvēka darbības rezultātā. Daudzaģentu sistēmas un cilvēka darbības rezultātu salīdzinājums trīs mēnešu laikā apkopots 5.5. tabulā.

5.5. tabula

Daudzaģentu sistēmas un cilvēka darbības rezultātu salīdzinājums

Laika posms	Daudzaģentu sistēmas darbības rezultāts	Cilvēka darbības rezultāts
Sākumdati	172403	
1. mēnesis	148413	155531
2. mēnesis	135550	176903
3. mēnesis	136084	190097

Ir redzams, ka ar daudzģentu sistēmas palīdzību krājumi un ar tiem saistītās uzglabāšanas izmaksas samazinājās. Pieprasījums ir izpildīts, līdz ar to var secināt, ka sistēma darbojas efektīvi. Ja Krājumu vadības aģentu izņem no sistēmas, ražošana notiek pēc intuitīvām cilvēka darbībām.

Papildu eksperiments daudzģentu sistēmas darbības pārbaudei

Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt daudzģentu sistēmu, izmantojot uzņēmuma datus, bet mazākā laika periodā: deviņi mēneši – analīzei, astoņi mēneši – darbības analīzei. Eksperimenta laikā tika apskatītas aģentu darbības, lielāku uzmanību pievēršot Ražošanas un Krājumu vadības aģenta darbībām un to rezultātiem.

Pirms daudzģentu sistēmas katra jauna gadījuma lietošanas sākuma ir jāveic pieci daudzģentu sistēmas pielāgošanas soļi, kas aprakstīti ceturtās nodaļas beigās.

Dažādu pircēju pieprasījumu apstrāde, kā arī izvēle starp dažādiem piegādātājiem, šajā eksperimentā netiks aprakstīti, jo aģentu darbības un to rezultāti nemainījās.

Pirmā Krājumu vadības aģenta palaišana, izmantojot jaunus datus, parādīja, ka ABC analīzes rezultāti (5.6. tab.) ir līdzīgi iepriekšņemtajiem (5.1. tab.). Tie atšķiras vienā pozīcijā, kas tika novērtēta kā B klase, un pārējā A klases produkcija atšķiras ar ranga vērtību.

Krājumu vadības aģenta darbības rezultātā tika aprēķināti arī prognozētie pieprasījumi, drošības krājumi un pasūtīšanas punkti.

Pieprasījuma prognoze tika aprēķināta atbilstoši esošajiem prognozēšanas algoritmiem un to izvēles kārtībai: katrai produkcijai tika izmantoti daudzģentu sistēmas prognozēšanas algoritmi iepriekšējiem astoņiem mēnešiem, un to rezultāti tika salīdzināti ar devītā mēneša datiem. Algoritms ar mazāku prognozēšanas kļūdu, šai produkcijai tiek uzskatīts par piemērotu prognozei nākamajam mēnesim. Līdzīgi tiek izvēlēts prognozēšanas algoritms pārējai produkcijai.

ABC analīzes rezultāts

Produkcija	Rangs	ABC analīzes rezultāts
<i>MChip1</i>	10	A
<i>MChip2</i>	3	A
<i>MChip6</i>	5	A
<i>MChip12</i>	2	A
<i>MChip14</i>	11	A
<i>MChip17</i>	1	A
<i>MChip22</i>	4	A
<i>MChip36</i>	8	A
<i>MChip47</i>	7	A
<i>MChip53</i>	6	A
<i>MChip54</i>	9	A

Daudzaģentu sistēmas darbības efektivitāte tika pārbaudīta, salīdzinot ar uzņēmuma darbinieku rezultātu astoņu mēnešu datiem (5.7. tab.).

Daudzaģentu sistēmas un cilvēka darbības rezultātu salīdzinājums

Laika posms	Daudzaģentu sistēmas darbības rezultāts	Cilvēka darbības rezultāts
Sākumdati	166940	
1. mēnesis	146017	170031
2. mēnesis	118116	156209
3. mēnesis	120516	170344
4. mēnesis	111495	153455
5. mēnesis	105740	157306
6. mēnesis	99405	155531
7. mēnesis	97662	176903
8. mēnesis	96931	190097

No iegūtiem rezultātiem var secināt, ka izstrādātā daudzģentu sistēma pielāgojas konkrētajam lietošanas gadījumam, piedāvājot krājumu daudzumu un ar to saistīto izmaksu samazināšanu.

Izstrādātās sistēmas lietošanas efektivitātes mērīšana

Izstrādātās daudzģentu sistēmas veikspēja analizēta saskaņā ar iepriekš definētiem veikspējas mērīšanas rādītājiem (1.1. tab.): kopējais ražošanas laiks; krājumu uzglabāšanas izmaksas; pircēju pieprasījumu apstrādes laiks; servisa līmenis.

Kopējais ražošanas laiks

Ražošanas secības plānošanā un pārplānošanā, it īpaši, ja pastāv ražošanas iekārtu noslodzes ierobežojumi un ilgš (vidēji mēnesis) ražošanas laiks, bet pieprasījumi jāizpilda mēneša, pusotra mēneša laikā, kopējā ražošanas laika samazināšana ir būtisks uzdevums.

Promocijas darba izstrādes laikā dažādu preču ražošanas secību plānošanas un pārplānošanas rezultāti atšķīrās līdz divām nedēļām viena mēneša laikā. Cilvēks var intuitīvi vai pēc savas pieredzes izvēlēties ātrāko ražošanas secību, taču produkcijas secības variantu ilgums var svārstīties no trīs dienām līdz divām nedēļām mēneša laikā.

Krājumu uzglabāšanas izmaksas

Pētījuma gaitā tika sasniegti dažādi krājumu līmeņi, kas veidojas cilvēka un daudzāģentu sistēmas darbības dēļ. Abos gadījumos pircēju pieprasījumi tika apmierināti, taču krājumu līmenis gatavās produkcijas noliktavā atšķīrās (5.5. tab.).

Papildu eksperimenta laikā tika saņemti šādi rezultāti: krājumu līmenis daudzāģentu sistēmas darbības rezultātā pakāpeniski samazinās; pēc divu mēnešu daudzāģentu sistēmas darbības tika saņemts zems pieprasījums (divreiz mazāks nekā vidējais par 11 mēnešiem), tāpēc nākamajos mēnešos krājumu līmenis samazinājās lēnāk.

Daudzāģentu sistēmas darbības rezultātā krājumu līmenis samazinājās, līdz ar to samazinājās arī uzglabāšanas izmaksas un iesaldētie finansiālie līdzekļi; tāpat, ņemot vērā atbilstošo kritēriju, mērķis ir sasniegts.

Pircēju pieprasījumu apstrādes laiks

Starpmezglu sadarbību var novērtēt, salīdzinot cilvēka un aģenta patērēto laiku, kas nepieciešams sadarbībai. Pieprasījuma apstrādes laiku ietekmējošie faktori cilvēkam ir šādi: darba noslodze; darba pārtraukums un veselības stāvoklis; pasūtīto produkciju un krājumu līmeņu salīdzinājums un cilvēkfaktors. Tā rezultātā pieprasījuma apstrādes laiks var svārstīties:

- cilvēkam – no 10 minūtēm līdz vienai darba dienai,
- aģentam – līdz 1 minūtei.

Servisa līmenis

Visi pieprasījumi tika izpildīti, vēlamais servisa līmenis ir sasniegts.

Piektās nodaļas secinājumi

1. Prognozēšanas algoritmu izvēle piedāvā katra produkta prognozes pielāgšanu atbilstoši tā pagātnes vērtībām.
2. Reālā pieprasījuma salīdzināšana ar prognozēto pieprasījumu pēc katra jauna pieprasījuma laikus nodrošina korekcijas jaunajos ražošanas pasūtījumos.

Daudzāģentu sistēmas praktiskās aprobācijas rezultāti liecina par tās lietošanas efektivitāti.

PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTU ANALĪZE UN SECINĀJUMI

Promocijas darbā tika sasniegts tā mērķis – izstrādāta pieeja daudzāģentu sistēmas izveidošanai, kas nodrošina piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanu. Visi definētie uzdevumi tika sekmīgi izpildīti. Promocijas darba izstrādes laikā tika iegūti vairāki rezultāti.

1. **Izanalizēti un atlasīti piegādes ķēdes vadības efektivitātes rādītāji.** Analīzes rezultātā tika noteikts, ka visbiežāk izmantotie veiktspējas rādītāji ir: pasūtījuma izpildes laiks; preču un izstrādājumu kvalitāte; jaudas izmantošana; klientu apkalpošanas līmenis; piegāde laikā; klienta pieprasījuma apstrādes laiks; krājumu izmaksas. Izstrādātajai

daudzaģentu sistēmai promocijas darba izstrādes laikā sistēmas efektivitātes pārbaudei piedāvāts izmantot šādus efektivitātes rādītājus: kopējais ražošanas laiks; krājumu uzglabāšanas izmaksas; pircēju pieprasījumu apstrādes laiks; servisa līmenis. Šie rādītāji pārklāj galvenos piegādes ķēdes uzdevumus, un izstrādātajā daudzģentu sistēmā efektivitātes rādītāji var tikt pievienoti, ja šāda nepieciešamība radīsies.

2. **Izpētītas daudzģentu sistēmas, to lietošana piegādes ķēdes vadībai un to atkārtotas lietošanas iespējas.** Daudzģentu sistēmas tiek izmantotas dažādiem uzdevumiem un pētījumiem. Lai gan to izmantošana pierādīja piegādes ķēdes vadības uzlabošanu, katram konkrētajam gadījumam ir nepieciešams izstrādāt jaunu daudzģentu sistēmu. Esošās daudzģentu sistēmas nav piemērotas atkārtotai izmantošanai un pilnībā neaptver piegādes ķēdes vadības uzlabošanas prasības: spēju darboties ar reālu uzņēmuma datiem; spēju paredzēt pieprasījumu; ražošanas plānošanu un pārplānošanu, spēju komunicēt ar piegādātājiem un klientiem; krājumu vadības metodoloģijas lietošanu; informācijas koplietošanu starp viena uzņēmuma aģentiem; atkārtotu daudzģentu sistēmas izmantošanu. Pētījuma rezultātā tika secināts, ka ir jāizstrādā daudzģentu sistēma, kas aptver šīs prasības.
3. **Izstrādāta daudzģentu sistēmas arhitektūra.** Promocijas darbā tika izvēlēta heterogēna aģentu sistēma un modelī un mērķī balstīta aģentu arhitektūra. Aģentu mijiedarbībai kā sazināšanas līdzekli starp piegādes ķēdes mezgliem tika piedāvāts izmantot ontoloģiju un ieviest informācijas koplietošanu starp viena piegādes ķēdes mezgla aģentiem. Tika izstrādāta pieeja daudzģentu sistēmas izveidošanai, kas nodrošina piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanu un ļauj to izmantot dažādiem dalībniekiem. Atkārtotai sistēmas lietošanai tika piedāvāts izstrādāt lietotāja saskarni, ar kuras palīdzību daudzģentu sistēmai var aprakstīt katra individuāla gadījuma ražošanas procesu. Izvēlētajā izstrādāšanas platforma ļauj viegli pārkonfigurēt daudzģentu sistēmu un iekļaut papildu aģentus vai tos izņemt, ja šāda nepieciešamība radīsies.
4. **Izveidota atkārtoti lietojama daudzģentu sistēma, un tā aprobēta, izmantojot reāla uzņēmuma datus.** Pēc izstrādātās pieejas tika izveidota daudzģentu sistēma, un tā tika pārbaudīta ar ražošanas uzņēmuma, kas nodarbojas ar mikroshēmu ražošanu un to talāku pārdošanu, piemēru. Promocijas darbā tika apskatīta katra aģenta darbība atsevišķi, kā arī starpmezglu saziņa starp ražotāju un piegādātāju un starp ražotāju un pircēju. Pētījuma laikā tika pārbaudīts, ka Ražošanas aģents daudzģentu sistēmas darbības laikā piedāvāja ražošanas plānu, kas samazināja kopējo ražošanas laiku. Promocijas darbā tika eksperimentāli pārbaudīta dažādu pircēju pieprasījumu apstrāde, izvēle starp dažādiem piegādātājiem un daudzģentu sistēmas lietošana no viena līdz trim mēnešiem, analizējot iegūtos rezultātus un salīdzinot ar rezultātiem, kas saņemti par cilvēka darbību.
5. **Eksperimentāli pierādīta izstrādātās sistēmas lietošanas efektivitāte.** Izstrādātās daudzģentu sistēmas lietošanas efektivitāte tika novērtēta, izmantojot efektivitātes rādītājus: kopējais ražošanas laiks; krājumu uzglabāšanas izmaksas; pircēju pieprasījumu apstrādes laiks; servisa līmenis. Ražošanas aģenta ražošanas plānošanas un pārplānošanas rezultātā tika samazināts kopējais ražošanas laiks. Krājumu vadības aģenta algoritms ar prognozēto pieprasījumu un tā koriģēšanu, saņemot reālo pieprasījumu, uzrādīja labākus rezultātus, nekā bez prognozēšanas koriģēšanas vai salīdzinot ar cilvēka darbības

rezultātiem, kā arī noteica pasūtīšanas punktus un drošības krājumus, šādi samazinot krājumu uzglabāšanas izmaksas. Savukārt starpmezglu mijiedarbībā daudzāģentu sistēma uzrādīja ātrākus rezultātus, salīdzinot ar cilvēka darbību.

Ņemot vērā promocijas darbā iegūtos rezultātus un veiktos eksperimentus, tika izdarīti vairāki secinājumi.

1. Daudzāģentu sistēmas tiek plaši izmantotas, bet katram gadījumam jāizveido jauna daudzāģentu sistēma. Izstrādātā daudzāģentu sistēma var tikt pielāgota dažādiem piegādes ķēdes dalībniekiem, jo ir piedāvāts atspoguļot katru piegādes ķēdes mezglu ar vienādu āģentu kopumu, kas aptver piegādes ķēdes funkcijas, nodrošinot piegādes ķēdes rādītāju uzlabošanu. Savukārt āģentu skaits var tikt izvēlēts katram lietojumam atsevišķi.
1. Piedāvātie veikspējas rādītāji spēj noteikt izstrādātās daudzāģentu sistēmas lietošanas efektivitāti. Tie ir krājumu uzglabāšanas izmaksas, kopējais ražošanas laiks, pircēju pieprasījumu apstrādes laiks un servisa līmenis, un nepieciešamības gadījumā var pievienot arī citus efektivitātes rādītājus.
2. Piedāvātā ontoloģijas un informācijas koplietošanas izmantošana daudzāģentu sistēmā nodrošina jaunu, hibrīdu saziņas iespēju starp āģentiem, kad tie izvairās no saziņas nepieciešamības un izmanto cita āģenta darbībai nepieciešamo informāciju, tādējādi paātrinot daudzāģentu sistēmas darbību. Šādi tika apstiprināta pirmā hipotēze.
3. Ontoloģijas lietošana, izmantojot profila ontoloģiju katram atsevišķam lietojumam, nodrošināja daudzāģentu sistēmas atkārtotu lietošanu, izveidojot daudzāģentu sistēmas veidni piegādes ķēdes vadības efektivitātes uzlabošanai un katru jaunu lietojumu kā ontoloģijas eksemplāru. Šādi tika apstiprināta otrā hipotēze.

Izstrādātās daudzāģentu sistēmas praktiskās lietošanas rezultāti ļauj secināt par tās efektivitāti.

Pēc promocijas darba iegūtajiem rezultātiem un secinājumiem var iezīmēt turpmāko pētījumu virzienus, lai attīstītu izstrādāto daudzāģentu sistēmu. Sistēmas produktivitāti iespējams uzlabot, Transportēšanas āģentam izmantojot *RFID* tehnoloģiju, Pārdošanas āģentam izstrādājot izsoles mehānismu. Turpmākajos pētījumos Krājumu vadības āģentam iespējams pievienot jaunus prognozēšanas algoritmus un pārbaudīt āģenta darbības efektivitāti. Vēl viens attīstības virziens var būt saistīts ar āģentu apmācības iespējām, lietojot to pielāgošanos nezināmai videi un uzvedības uzlabošanu. Šis pētījuma virziens interesē autori, un autore uzskata, ka apmācāmi āģenti piegādes ķēdes vadībai varētu piedāvāt jaunus sasniegumus efektivitātes uzlabošanā.

Izstrādātā daudzāģentu sistēma ir daudzāģentu sistēmas pirmā versija, kas pierādīja darbības efektivitāti, un laika gaitā tā tiks papildināta ar jaunām funkcijām un algoritmiem.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Ajitha, S., Prasad, M., Kumar, T. V. S. Auction using Multi-Agent System. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*. 2016, Vol. 5, Special Issue 2, 165–168.
2. Agami, N., Saleh, M., Rasmy, M. Supply Chain Performance Measurement Approaches: Review and Classification. *IBIMA Publishing Journal of Organizational Management Studies*. 2012, pp. 1–20. Available from: [DOI: 10.5171/2012.872753](https://doi.org/10.5171/2012.872753).
3. Alkahtani, N. H., Almohsen, S., Alkahtani, N. M., Almalki, G. A. et al. A Semantic Multi-Agent system to Exchange Information between Hospitals. In: *8th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, ANT-2017 and the 7th International Conference on Sustainable Energy Information Technology, SEIT 2017*, 16–19 May 2017, Madeira, Portugal, 2017, p. 704–709.
4. Alzoubi, H. Applying Electronic Supply Chain Management Using Multi-Agent System: A Managerial Perspective. *International Arab Journal of e-Technology*. 2010, vol. 1, no. 3, 106–113.
5. AnyLogistics Supply Chain Software. *Supply Chain Digital Twins* [online], [viewed 31 January 2021]. Available from: <https://www.anylogistix.com/supply-chain-digital-twins/>.
6. Badica, C., Budimac, Z., Burkhard, H. D., Ivanovic, M. Software Agents: Languages, Tools, Platforms. *Computer Science and Information Systems*. 2011, vol. 8, no. 2, 255–298.
7. Beer, M., Fasli, M., Richards, D. *Multi-Agent Systems for Education and Interactive Entertainment Multi-Agent Systems for Education and Interactive Entertainment: Design, Use and Experience*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2010, 330 p.
8. Bermejo-Alonso, J., Sanz, R. A Survey on Ontologies for Agents. In: *From Theory to Practice ASLab-ICEA-R*. 2006.
9. Bordini, R. H., Braubach, L., Dastani, M., Seghrouchni, A. E. F., et al. A Survey of Programming Languages and Platforms for Multi-agent Systems. *Informatica-(Ljubl.)*. 2006, vol. 30, no. 1, 33–44.
10. Borst, Willem Nico. *Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse*. PhD thesis. Enschede, The Netherlands: Center for Telematics and Information Technology, University of Twente, 1997. 227 p.
11. Brank, J., Grobelnik, M., Mladenic, D. A survey of ontology evaluation techniques. In: *Proceedings of the Conference on Data Mining and Data Warehouses (SiKDD 2005), October 5th, 2015, Ljubljana, Slovenia*. Citeseer, vol. 17, 2005. Available from: <https://ai.ia.agh.edu.pl/media/pl:miw:2009:brankevaluationsikdd2005.pdf>.
12. Cavazza, M., Mead S. J., Strachan A.I., Whittaker A. A Blackboard System for Interpreting Agent Messages. In: *Proceedings GameOn 2000: International Conference on Intelligent Games & Simulation, November 11–12, 2000, London, UK*. 2000.
13. Chae, B. Developing Key Performance Indicators for Supply Chain: an Industry Perspective. *Supply Chain Management*. 2009, vol. 14, Issue 6, 422–428.
14. Chandra, C., Grabis, J. *Supply Chain Configuration: Concepts, Solutions, and Applications*. New York: Springer New York, 2016. 297 p.

15. Chen, Y. A Negotiation-based Multi-agent System for Supply Chain Management. In: *ACM Autonomous Agents workshop on Agent-based Decision-support for Managing the Internet-enabled Supply-chain*. Seattle, Washington, May 1, 1999, pp. 15–20.
16. Christopher, M. *Logistics and Supply Chain Management*. 5th ed. FT Press; 2016. 328 p.
17. Chopra, S. P. *Supply Chain Management. Strategy, Planning, and Operation*. 7th ed. Pearson, 2018. 528 p.
18. Corrales L. del C. Ng., Lambán, M. P., Korner, M. E. H, Royo, J. Overall Equipment Effectiveness: Systematic Literature Review and Overview of Different Approaches. *Applied Science*, 2020, 10, 6469.
19. Corkill, D. Blackboard systems. *AI Expert*. 1991, vol. 6, no. 9, 40–47.
20. Dayal, S., Sherman, R. *Digital Twins: Through the Supply-Chain Looking Glass* [online]. SupplyChainBrain, 2019 [viewed 31 January 2021]. Available from: <https://www.supplychainbrain.com/blogs/1-think-tank/post/29926-digital-twins-through-the-supply-chain-looking-glass>.
21. Dong, J., Chen, S., Jeng, J.-J. Event-based blackboard architecture for multi-agent systems. In: *Proceedings of the International Symposium on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'05)*, Las Vegas, Nevada, USA, 4–6 April 2005. Vol. 2. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005, 379–384.
22. Ganeshan, R., Harrison, T. P. *An Introduction to Supply Chain Management*. [online] Department of Management Sciences and Information Systems. Penn State University, University Park, Pennsylvania. 1995. [viewed 31 January 2021]. Available from: http://lcm.csa.iisc.ernet.in/scm/supply_chain_intro.html.
23. Giuffra, P., Cecilia, E., Silveira, R. A. A Multi-agent System Model to Integrate Virtual Learning Environments and Intelligent Tutoring Systems. *International Journal of Artificial Intelligence and Interactive Multimedia*, vol. 2, no. 1, 2013, 51–58.
24. González-Briones, A., De La Prieta, F., Mohamad, M. S., Omatu, S. et al. Multi-Agent Systems Applications in Energy Optimization Problems: A State-of-the-Art Review, *Energies*, 2018, 11, 1928.
25. Gruber, T. R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993, vol. 5, no. 2, 199–220.
26. Guarino, N., Oberle, D., Staab, S. What Is an Ontology? In: Staab S., Studer R. (eds) *Handbook on Ontologies*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, pp. 1–17.
27. Gunasekaran, A., Patel, C., McGaughey, R. E. A framework for supply chain performance measurement. *International Journal of Production Economics*. 2004, vol. 87, no. 3, 333–347.
28. Fox, M. S., Barbuceanu, M., Teigen, R. Agent-Oriented Supply-Chain Management. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2000, vol. 12, 165–188.
29. Helaakoski, H., Kipinä, J., Haapasalo, H. An Agent Architecture for Steel Product Business Networks. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2004)*, Porto, Portugal, April 14-17, 2004, pp. 467–470.
30. Hervani, A., Helms, M. M., Sarkis, J. Performance Measurement for Green Supply Chain Management. *Benchmarking: An International Journal*. 2005, vol. 12, no. 4, 330–353.

31. Intrieri, C. *9 Steps to Establish the Lean Supply Chain: A System of Interconnected & Interdependent Partners*, [online], Cerasis Globaltranz [viewed 31 January 2021]. Available from: <http://cerasis.com/2015/05/06/lean-supply-chain/>.
32. Jemal, H, Kechaou, Z., Ayed, M. B., Alimi, A. M. A Multi Agent System for Hospital Organization. *International Journal of Machine Learning and Computing*, Vol. 5, No. 1, 2015, 51–56.
33. Jennings, N. R., Sycara, K., Wooldridge, M. A Roadmap of Agent Research and Development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 1998, vol. 1, 7–38.
34. Kesaniemi, J., Katasonov, A., Terziyan, V. An observation framework for multi-agent systems. *Fifth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems*. Valencia, 2009, 336–341.
35. Kilpatrik, J. *COVID-19: Managing supply chain risk and disruption*, [online]. 2020 [viewed 31 January 2021]. Available from: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ca/Documents/finance/Supply-Chain_POV_EN_FINAL-AODA.pdf.
36. Kleijnen, J., Smits, M. Performance metrics in supply chain management. *Journal of the Operational Research Society*. 2003, vol. 54, 507–514.
37. Kovalchuk, Y., Fasli, M. A Demand-Driven Approach for a Multi-Agent System in Supply Chain Management. In: David E., Gerding E., Sarne D., Shehory O. (eds) *Agent-Mediated Electronic Commerce. Designing Trading Strategies and Mechanisms for Electronic Markets. AMEC 2009, TADA 2009. Lecture Notes in Business Information Processing*, vol. 59. Springer, Berlin, Heidelberg, 88–101.
38. Kravari, K., Bassiliades, N. *A Survey of Agent Platforms*. [online] *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 18(1) 11, 2015, [viewed 31 January 2021]. Available from: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/1/11.html>.
39. Lavendelis, E. Extending the MASITS Methodology for General Purpose Agent Oriented Software Engineering. In: *Proceedings of the International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART-2015)*, Lisbon, Portugal, Vol. 2: ICAART, January 10–12, 2015, pp. 157–165.
40. Lavendelis, E., Grundspenkis, J. Multi-agent Auction Based Simulation Tool for an Insurance Policy Market. *Applied Computer Systems*. Vol. 15, 2014, 5–13.
41. Lim, M. *The Difference Between Agile vs. Lean Supply Chain Management* [online]. Blog Procurify, 2014 [viewed 31 January 2021]. Available from: <http://blog.procurify.com/2014/04/22/agile-lean-supply-chain-management/>.
42. Lozano-Tello, A., Gómez-Pérez, A. “Ontometric: A method to choose the appropriate ontology”, *Journal of Database Management*, vol. 15, issue 2, 2004, 1–18.
43. Maes, P. Artificial Life Meets Entertainment: Lifelike Autonomous Agents. *Communications of the ACM*. 1995, vol. 38, no. 11, 108–114.
44. Marmolejo, J., Hurtado, M., Suarez-Valdes, R. Digital Twins in Supply Chain Management: A Brief Literature Review. *Intelligent Computing and Optimization*, 2020, pp. 653–661.

45. Melnyk, S. A., Narasimhan, R., DeCampos, H. A. Supply Chain Design: Issues, Challenges, Frameworks And Solutions. *International Journal of Production Research*, 2014, 52:7, pp. 1887–1896.
46. Melo, M. T., Nickel, S., Saldanha-da-Gama F. Facility Location and Supply Chain Management – a Review. *European Journal of Operational Research*. 2009, vol. 196, 401–412.
47. Metzner, C., Cortez L., Chacin D. Using A Blackboard Architecture In A Web Application. *The Journal of Issues in Informing Science and Information Technology*. 2005, vol. 2, 743–756.
48. Misra, V., Khan, M. I. Supply Chain Management Systems: Architecture, Design and Vision. *Journal of Strategic Innovation and Sustainability*. 2010, vol. 6, issue 4, 96–101.
49. Moraitis, P., Spanoudakis, N. The Gaia2Jade process for multi-agent systems development. *Applied Artificial Intelligence*. 2006, vol. 20, issue 2–4, 251–273.
50. Moreira J. J., Reis L. P. Multi-agent System for Teaching Service Distribution with Coalition Formation. In: Rocha Á., Correia A., Wilson T., Stroetmann K. (eds) *Advances in Information Systems and Technologies. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 206. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 599–609.
51. Musen, M. A. and Protégé Team. The Protégé Project: A Look Back and a Look Forward. *AI Matters*. 2015, vol. 1, issue 4. Available from: <https://doi.org/10.1145/2757001.2757003>.
52. Myerson, P. *Lean Supply Chain and Logistics Management*. 1st Edition. MacGraw Hill Education, 2012. 288 p.
53. Naveen, B., Babu, T.R. Productivity Improvement Using Industrial Engineering Tools. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 2012, pp. 11–18.
54. Nwana, H. S., Software Agents: An Overview. *The Knowledge Engineering Review*. 1996, vol. 11, no. 3, 205–244. Available from: <https://doi.org/10.1017/S026988890000789X>.
55. Oberholzer, J. J., Botha, R. A. How Agent Technologies Could Be Used In Supply Chain Management. In: *Proceedings of SAICSIT, Johannesburg, South Africa, 2003*. South African Institute for Computer Scientists and Information Technologists, 2003, pp. 111–121.
56. Odunayo, A., Adim, V. (2020). COVID-19 and Supply Chain Disruption: A Conceptual Review. *Asian Journal of Economics Business and Accounting*. 2020, vol. 19, no. 2, 40–47.
57. Ono Y., Uchiyama H., Potter W. A mobile robot for corridor navigation: a multi-agent approach. In: *ACM Southeast Regional Conference Proceedings of the 42nd annual Southeast regional conference SESSION: Artificial intelligence. Huntsville Alabama, April, 2004*. Association for Computing Machinery, New York, United States, vol. 1, 379–384.
58. Plinere, D., Aleksejeva, L. Agent System Application as a Tool for Inventory Management Improvement. In: *Proceedings of Eighth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control (ICSCCW-2015), Turkey, Antalya, 3–4 September, 2015*. b-Quadrat Verlag, 2015, pp. 157–166.

59. Plinere, D., Aleksejeva, L. Production Scheduling in Agent-based Supply Chain for Manufacturing Efficiency Improvement. *Procedia Computer Science*. 2019, vol. 149, 36–43. (ICTE in Transportation and Logistics 2018).
60. Plinere, D. Blackboard Architecture Programming for Product Life Cycle Stage Definition. *Scientific Journal of Riga Technical University. Information Technology and Management Science*. 2008, vol. 35, issue 5, 70–75.
61. Plinere, D., Borisov, A., Aleksejeva, L. Interaction of Software Agents in the Problem of Coordinating Orders. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2015, vol. 49, no. 5, 268–276.
62. Plinere, D., Borisov, A. A Negotiation-Based Multi-Agent System for Supply Chain Management. *Scientific Journal of Riga Technical University. Information Technology and Management Science*. 2011, vol. 49, 128–132.
63. Plinere, D., Borisov, A. Case Study on Inventory Management Improvement. *Scientific Journal of Riga Technical University. Information Technology and Management Science*. 2015, vol. 18, 91–96.
64. Plinere, D., Borisov, A. Development of Ontological Knowledge Model for Raw Materials Management Task. *Scientific Journal of Riga Technical University. Information Technology and Management Science*. 2014, vol. 17, 61–65.
65. Plinere, D., Borisov, A. Evaluation of the Ontological Knowledge Model. *Scientific Journal of Riga Technical University. Information Technology and Management Science*. 2014, vol. 17, 81–85.
66. Plinere, D., Borisov, A. The Golden Section Task as a Tool of Ontology Logical Inference. In: *Proceedings of Ninth International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing (ICAFFS-2010), Czech Republic, Prague, 26–27 August, 2010*. Kaufering: b-Quadrat Verlag 86916 Kaufering, 2010, pp. 41–48.
67. Plinere, D., Borisov, A. Ontology-Based Knowledge Acquisition System for Product Life Cycle Task. In: *Mendel 2009: Proceedings of 15th International Conference on Soft Computing, Czech Republic, Brno, 24–26 June, 2009*. Brno: Brno University of Technology, 2009, pp. 292–297.
68. Plinere, D., Borisov, A. SWRL: Rule Acquisition Using Ontology. *Scientific Journal of Riga Technical University. Information Technology and Management Science*. 2009, vol. 40, 117–122.
69. Plinere, D., Merkurjev, Y. Designing A Multi-Agent System For Improving Supply Chain Performance. In: A. Romanovs, D. Navakauskas, A. Senfelds (eds.) *Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE): Proceedings of the 7th IEEE Workshop, Liepaja, Latvia, 15–16 November, 2019*. IEEE, 2019, pp. 62–68.
70. Porzel, R., Malaka, R. A Task-Based Approach for Ontology Evaluation. *ECAI Workshop Ontology Learning and Population (OLP)*. Valencia, Spain. 2004.
71. Raka, C., Liangrokapt, J. Supply Chain Risk Management: a Case Study in Thailand. In: Kersten, W., Blecker, T.; Ringle, C. M. (eds.) *Innovations and Strategies for Logistics and Supply Chains: Technologies, Business Models and Risk Management : Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*, No. 20, epubli GmbH, Berlin 2015, pp. 557–578.

72. Robinson, A. *History & Academic Definition of Supply Chain and Logistics Management* [online], Cerasis Globaltranz [viewed 31 January 2021]. Available from: <https://cerasis.com/supply-chain-and-logistics-management/>.
73. Rudenko, D., Borisov, A. Agents in Supply Chain Management: An Overview. *Scientific Journal of Riga Technical University. Information Technology and Management Science*. 2006, vol. 28, 123–133.
74. Rudenko, D., Borisov, A. An Overview of Blackboard Architecture Application for Real Tasks. *Scientific Journal of Riga Technical University. Information Technology and Management Science*. 2007, vol. 31, 50–56.
75. Rudenko D., Borisov, A. Blackboard architecture for product life cycle stage definition In: R. Matoušek (ed.) *Mendel 2008: Proceedings of 14th International Conference on Soft Computing, Czech Republic, Brno, 18–20 June, 2008*. Brno: Brno University of Technology, 2008, pp. 252–257.
76. Russell, S. J., Norvig, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4th Edition. Pearson, Englewood Cliffs, New Jersey, 2020. 1136 p.
77. Sardinha, J. A. R. P., Molinaro, M. S., Paranhos, P. M., et al. A Multi-Agent Architecture for a Dynamic Supply Chain Management. In: *G. Sutcliffe, R. Goebel (eds.) Proceedings of the Nineteenth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, Melbourne Beach, Florida, USA, May 11–13, 2006*. AAAI Press, 2006, pp. 178–179.
78. Scheuermann, A., Leukel, J. Supply Chain Management Ontology from an Ontology Engineering Perspective. *Computers in Industry*. 2014, vol. 65, no. 6, 913–923.
79. Serra, I., Girardi, R. A Process for Extracting Non-Taxonomic Relationships of Ontologies from Text. *Intelligent Information Management*. 2011, vol. 3, no. 4, 119–124.
80. Shakshuki, E., Reid, M. Multi-agent System Applications in Healthcare: Current Technology and Future Roadmap. *The 6th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT-2015), the 5th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2015)* vol. 52, 2015, pp. 252–261.
81. Sharma, A., Maheshwari, R., Juneja, A., Rajput, J. R. Calculation and Improvement of Overall Equipment Effectiveness (OEE) of A Model Machine in A Production Line. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, vol. 5 issue 5, 2017.
82. Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E. *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies*. 3rd Edition. McGraw-Hill. 2008, 528 p.
83. Soshko, O., Vjakse, V., Merkurjev, Y. Modelling Inventory Management System at Distribution Company: Case Study. *Scientific Journal of Riga Technical University, Information Technology and Management Science*. 2010, vol. 44, 87–93.
84. Studer, R., Benjamins, R., Fensel, D. Knowledge Engineering: Principles and Methods. *Data & Knowledge Engineering*. 1998, vol. 25, issue 1–2, 161–197.
85. Swaminathan, J. M., Smith, S. F., Sadeh, N. M. Modeling Supply Chain Dynamics: A Multi-Agent Approach. *Decision Sciences*. 1998, vol. 29, no. 3.
86. Tatum, M. *What Is Raw Materials Management?* [online] WiseGEEK, [viewed 3 February 2021]. Available from: <http://www.wisegeek.com/what-is-raw-materials-management.htm>.

87. Tietze, A.-C., Cirullies, J., Otto, B. Automotive Supply-Chain Requirements for a Time-Critical Knowledge Management. In: Kersten, W., Blecker, T.; Ringle, C. M. (eds.) *Digitalization in Supply Chain Management and Logistics: Smart and Digital Solutions for an Industry 4.0 Environment: Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*, No. 23, epubli GmbH, Berlin, 2017, pp. 467–489.
88. Thierry, C., Bel, G., Thomas, A. Supply Chain Management Simulation: An Overview. In: C. Thierry, A. Thomas, G. Bel (eds.) *Simulation For Supply Chain Management*. 1st Edition. ISTE and John Wiley & Sons, 2008, pp. 1–36.
89. Thilakarathna, R. H., Dharmawardana, M. N., & Rupasinghe, T. The Supply Chain Operations Reference (SCOR) model: A Systematic Review of Literature from the Apparel Industry. In: *Proceedings of 12th International Conference on Business Management, (ICBM) 2015*, December 7–8, 2015, Colombo, Sri Lanka, pp. 1–25.
90. Van Liere R., Harkes J., de Leeuw W. A Distributed Blackboard Architecture For Interactive Data Visualization. In: *Proceedings of the conference on Visualization '98*. 18–23 Oct. 1998, Research Triangle Park, NC, USA, IEEE, pp. 225–231.
91. Vidal, J. M., Buhler, P. A., Huhns, M. N. Inside an Agent. *IEEE Internet Computing*. 2001, vol. 5, no. 1, 82–86.
92. Vita, M. A., Walko, J., Banerjee, S., Held, M. et al. *Repurpose Your Supply Chain*, [online]. Accenture, April 2020 [viewed 31 January 2021]. Available from: <https://www.accenture.com/acnmedia/PDF-121/Accenture-COVID-19-Repurpose-Supply-Chain.pdf>.
93. Voigt, K. I., Müller, J. M., Veile J. W, Schmidt, M. C. Sharing Information Across Company Borders in Industry 4.0. In: Kersten, W., Blecker, T.; Ringle, C. M. (eds.) *Artificial Intelligence and Digital Transformation in Supply Chain Management: Innovative Approaches for Supply Chains, Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*, No. 27, epubli GmbH, Berlin, 2019, pp. 57–86.
94. Vorne. *OEE (Overall Equipment Effectiveness)* [online]. Lean production made easy by Vorne, [viewed 31 January 2021]. Available from: <https://www.leanproduction.com/oehtml>.
95. Vrandečić, Denny. *Ontology Evaluation*. PhD thesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2010. 235 p.
96. Williamson, D. P., Shmoys, D. B. *The Design of Approximation Algorithms*. Cambridge University Press, 2011, 504 p.
97. Wooldridge, M. *An Introduction to MultiAgent Systems*. 2nd Edition. John Wiley & Sons, 2009. 484 p.
98. Wooldridge, M. In: Mařík V., Štěpánková O., Krautwurmová H., Luck M. (eds) *Multi-Agent Systems and Applications II. ACAI 2001*. Lecture Notes in *Computer Science*, vol. 2322. Springer, Berlin, Heidelberg. 2002, 3–43. Available from: https://doi.org/10.1007/3-540-45982-0_1.
99. Xie, J., Liu, C. C. Multi-agent Systems and Their Applications. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 7, no. 1, 2017, 188–197.

100. Zhu, Xiaozhou. Agent Based Modeling for Supply Chain Management: Examining the Impact of Information Sharing. *Electronic Thesis or Dissertation. Kent State University, OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center*. 2008.
101. Бессмертный, И. А. Системы искусственного интеллекта: Учебное пособие для академического бакалавриата. 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. 130 с.
102. Плинере, Д., Борисов, А., Алексеева, Л. Взаимодействие программных агентов в задаче согласования заказов. *Автоматика и вычислительная техника*. 2015, т. 49, № 5, 23–34.
103. Плинере, Д. Интеллектуальность агентной системы для управления закупками и запасами в цепи поставок. In: *International Conference “Information Intelligent Systems”*, Kharkiv, Ukraine, 17–19 April, 2012. vol. 6, Kharkiv: 2012, 148–149.
104. Хахалин, Г. Предметная онтология для понимания текстов геометрических задач. По материалам ежегодной международной конференции «Диалог», Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии, 2008, Выпуск 7 (14) Режим доступа: <http://www.dialog-21.ru/media/1818/khakhalin.pdf>.
105. Хахалин, Г. Прикладная онтология на языке гиперграфов. II Всероссийская конференция «Знания – Онтологии – Теории» (ЗОНТ-09), 20–22 октября 2009 г., Новосибирск, Россия 2009. Режим доступа: <http://www.math.nsc.ru/conference/zont09/reports/21Hahalin.pdf>.